

УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВЕНЬ



класс

Г. Я. Мякишев, А. З. Синяков

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА



ДРОФА

ФИЗИКА

Г. Я. Мякишев, А. З. Синяков

УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВЕНЬ

10 класс

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

Учебник

Рекомендовано Министерством просвещения Российской Федерации

8-е издание, стереотипное

Москва
ДРОФА
2019



Глава 1

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ ТЕПЛОТЫ

§ 1.1. ФИЗИКА И МЕХАНИКА

Механика составляет фундамент всей физики, но, конечно, не исчерпывает её. Теперь мы приступим к изучению других разделов физики. На очереди теплота.

Что даёт механика Ньютона?

Механика Ньютона, напомним, позволяет определить координаты и скорости тел в любой момент времени по известным значениям этих величин в начальный момент времени. Для решения этой задачи нужно знать силы, действующие между телами, т. е. знать, как зависят силы от расстояний между телами и их скоростей. Таким образом, механика количественно описывает движение: перемещение тел в пространстве с течением времени.

Физика во времена Ньютона

Во время создания классической механики были известны и изучались другие физические явления: тепловые, оптические, электрические и магнитные. Сам Ньютон много внимания уделял исследованию оптических явлений. Результаты этих исследований были им изложены в трактате «Оптика». Гораздо меньше внимания он уделял тепловым явлениям и, по-видимому, не проявлял заметного интереса к электричеству и магнетизму.

Успехи в изучении всех перечисленных выше процессов были несравненно меньшими, чем в изучении механическо-

го движения. Но и в самой механике оставался совершенно неясным вопрос о том, почему, вследствие каких физических причин появляются те или иные силы; какова природа сил. Силы необходимо было определять экспериментально.

Всё это понимал и сам Ньютон. Ему принадлежат замечательные слова: «Я не знаю, чем я кажусь миру; мне же самому кажется, что я был только мальчиком, играющим на берегу моря и развлекающимся тем, что от времени до времени находил более гладкий камушек или более красивую раковину, чем обыкновенно, в то время как великий океан истины лежал предо мной совершенно неразгаданным».

Механическая картина мира

Последовавшие за созданием основных принципов механики успехи в изучении Солнечной системы, движения не только твёрдых, но и жидких и газообразных тел настолько захватили воображение учёных, что они стали склоняться к мысли, что механика Ньютона всесильна.

Всё богатство, всё качественное многообразие мира — это результат различия в движении частиц, составляющих тела. Механика лежит в основе всех процессов в природе. Объяснить какое-либо явление — это свести его в конечном счёте к действию законов механики Ньютона. Такова сущность механической картины мира, сложившейся к середине XIX в.

Считалось, что тепловые явления можно свести к механическому движению частиц — атомов и молекул*, из которых, предположительно, построены все тела Вселенной. Электрические, магнитные и оптические явления — в своей основе это механические явления в гипотетической всепроникающей среде — мировом эфире.

Крах механической картины мира

Применение законов механики к описанию движения атомов и молекул в телах привело к определённым успехам.

Была построена молекулярно-кинетическая теория тепловых явлений или, как говорили в те времена, механическая теория тепла.

Однако при построении этой теории выяснилось, что одни только законы механики не в состоянии объяснить своеобра-

---

* От латинского слова moles — «масса», с уменьшительным суффиксом -cula — «наименьшая частица вещества».

зие всей совокупности тепловых процессов. Для этого необходимы дополнительные гипотезы.

С полной очевидностью ограниченность механической картины мира обнаружилась при развитии теории электромагнитных явлений. Выяснилось, что электромагнитное поле, осуществляющее взаимодействие между электрически заряженными частицами, не подчиняется законам механики Ньютона. Оно описывается своими специфическими законами — уравнениями Максвелла для поля.

В XX в. было установлено, что законы механики Ньютона описывают движение атомов и молекул лишь приближённо. Далеко не все тепловые явления можно понять, допуская применимость законов Ньютона для движения микрочастиц. Была построена новая механика движения микрочастиц — квантовая механика.

Тепловые и электромагнитные явления

После изучения классической механики мы перейдём к знакомству с новыми видами явлений, объяснение которых в рамках одной механики невозможно. Вначале будем рассматривать тепловые явления, а затем электрические и магнитные.

?

1. Назовите фамилию учёного, исследования которого заложили основу классической механики.
2. В чём заключается сущность механической картины мира?
3. Укажите причины краха механической картины мира.
4. Сформулируйте основную задачу механики.

§ 1.2. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Тепловые явления в окружающем нас мире столь же распространены, как и механические. Это самые значительные, самые заметные после механического движения явления. Они, как правило, связаны с нагреванием или охлаждением тел, с изменением их температуры.

Роль тепловых явлений

Привычный облик нашей планеты существует и может существовать только в довольно узком интервале температур. Если бы температура превысила 100 °C, то на Земле не стало бы рек, морей и океанов, не было бы воды вообще. Вся вода превратилась бы в пар. При понижении температуры на

несколько десятков градусов моря и океаны превратились бы в громадные ледники*.

При смене времён года на средних широтах изменение температуры на 20—30 °С меняет весь облик планеты. С наступлением весны начинается пробуждение природы. Леса одеваются листвой, зеленеют луга. Зимой жизнь растений замирает. Толстый слой снега покрывает землю.

Ещё более узкие интервалы температур необходимы для поддержания жизни теплокровных животных. Температура животных и человека поддерживается внутренними механизмами терморегуляции на строго определённом уровне. Достаточно температуре повыситься на несколько десятых градуса, как мы уже чувствуем себя нездоровыми. Изменение температуры на несколько градусов ведёт к гибели организмов.

Поэтому неудивительно, что тепловые явления привлекали внимание людей с древнейших времён. Умение добывать и поддерживать огонь сделало человека относительно независимым от колебаний температуры окружающей среды. Это было одним из величайших открытий человечества. Роль огня отражена в поэтическом древнегреческом мифе о Прометее. Прометей похитил огонь с Олимпа и передал его людям. За это он был прикован Зевсом к скале и обречён на многолетние мучения.

Свойства тел и температура

Почти все свойства тел зависят от температуры. Так, при нагревании и охлаждении меняются размеры твёрдых тел и объёмы жидкостей. Значительно меняются при нагревании или охлаждении обычные механические свойства тел, например упругость. Кусок резиновой трубки не пострадает, если при комнатной температуре ударить по нему молотком. Но при сильном охлаждении резина становится хрупкой, как стекло, и от лёгкого удара резиновая трубка разбивается на мелкие кусочки. Лишь после нагревания резина вновь обретает прежние свойства.

Кроме механических свойств, при изменении температуры меняются и другие свойства тел: сопротивление электрическому току, магнитные свойства, оптические и пр. Так, если сильно нагреть постоянный магнит, то он перестанет притягивать железные предметы.

---

* Предполагается, что давление воздуха при этом остаётся равным обычному атмосферному.

Тепловые процессы и строение вещества

Течение тепловых процессов непосредственно связано со строением вещества, его внутренней структурой. Например, тот факт, что нагревание парафина на несколько десятков градусов делает его жидким, а нагревание железного стержня на столько же градусов заметным образом на него не влияет (он только начинает обжигать пальцы), несомненно, связан с тем, что внутреннее строение парафина и железа различно. Поэтому тепловые явления можно использовать для выяснения структуры вещества. И наоборот, определённые представления о строении вещества способны пролить свет на физическую сущность тепловых явлений, дать им глубокое и наглядное истолкование.

Тепловые явления в технике

Очень важно, что открытие законов, которым подчиняются тепловые явления, позволяет с максимальной пользой применять эти явления на практике и в технике. Современные тепловые двигатели, холодильные установки, установки для сжижения газов и многие другие устройства конструируют на основе этих законов.

?
1. Как зависят физические свойства тел от их температуры?
2. Почему протекание тепловых процессов связано со строением вещества и, наоборот, каким образом строение вещества определяет протекание тепловых процессов?
3. Приведите примеры проявления тепловых явлений в быту и технике.

§ 1.3. КРАТКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Несмотря на видимую простоту и очевидность тепловых явлений, для понимания их сути учёным пришлось напряжённо работать несколько сотен лет. История создания теории тепловых процессов — пример того, каким сложным и подчас противоречивым путём добываются научные истины.

Воззрения древних

Большинство философов древности были склонны рассматривать огонь и связанную с ним теплоту как одну из стихий, которая наряду с землёй, водой и воздухом образует все

тела. Одновременно были сделаны попытки связать теплоту с внутренними движениями в телах, так как было замечено, что при соударении тел или трении их друг о друга они нагреваются.

Зарождение научной теории тепла

Первые успехи на пути построения научной теории тепла относятся к началу XVII в., когда был изобретён термометр и появилась возможность количественного исследования тепловых процессов. Этот прибор, к которому мы все так привыкли, по словам Р. Майера (одного из первооткрывателей закона сохранения энергии), явился «могущественным инструментом в титанической борьбе между истиной и заблуждением». Но о том, что же именно измеряют термометром, единого мнения не было. Вплоть до второй половины XVIII в. отсутствовало ясное разграничение понятий «температура» и «количество теплоты».

Экспериментальные исследования с применением термометра вновь остро поставили вопрос о том, что же такое теплота. Чётко наметились две диаметрально противоположные точки зрения. Согласно так называемой вещественной теории тепла, теплоту связывали с особого рода невесомой жидкостью, способной перетекать от одного тела к другому. Эта жидкость была названа теплородом. Чем больше теплорода в теле, тем выше температура тела.

Согласно другой точке зрения, теплота — это вид внутреннего движения частиц, составляющих тела. Чем быстрее движутся частицы, тем выше температура тела. В этой теории тепловые явления связывались с атомистическим учением древних философов о строении вещества. Теория первоначально называлась корпускулярной теорией тепла (от лат. corpusculum — частица). Её придерживались такие выдающиеся учёные, как И. Ньютон, Р. Гук, Р. Бойль, Д. Бернулли и др.

Большой вклад в развитие корпускулярной теории был сделан великим русским учёным М. В. Ломоносовым. Ломоносов рассматривал теплоту как вращательное движение частиц вещества. С помощью своей теории он дал правильное, в общих чертах, объяснение явлений плавления, испарения и теплопроводности. Им был сделан вывод о существовании «наибольшей или последней степени холода», когда движение частиц вещества прекращается. Благодаря работам Ломоносова и его авторитету среди русских учёных было мало сторонников вещественной теории тепла.

Теория теплорода

Несмотря на привлекательность и глубину корпускулярной теории тепла, к середине XVIII в. временную победу одержала теория теплорода. Это произошло после того, как экспериментально было доказано сохранение количества теплоты при теплообмене. Отсюда был сделан вывод о сохранении (неуничтожимости) тепловой жидкости — теплорода. На основе вещественной теории теплоты были введены понятия теплоёмкости тел, удельных теплот парообразования и плавления, построена количественная теория теплопроводности. Многими терминами, введёнными в то время, мы пользуемся и сейчас.

С помощью корпускулярной теории теплоты не удавалось получить столь важные для физики количественные связи между различными величинами, характеризующими тепловые процессы. В частности, эта теория не смогла объяснить, почему теплота сохраняется при теплообмене. В те времена не была ясна связь между механической характеристикой движения частиц — их кинетической энергией и температурой тела. Понятие энергии вообще ещё не было введено в физику. Поэтому на основе корпускулярной теории в XVIII в. не могли быть достигнуты те немалые успехи в развитии количественной теории тепловых явлений, какие были сделаны с помощью простой теории теплорода. Для своего времени теория теплорода была прогрессивной.



Ломоносов Михаил Васильевич (1711—1765) — великий русский учёный-энциклопедист, поэт и общественный деятель, основатель Московского университета, носящего его имя. А. С. Пушкин назвал М. В. Ломоносова «первым русским университетом». М. В. Ломоносову принадлежат выдающиеся труды по физике, химии, горному делу и металлургии. Он развил молекулярно-кинетическую теорию теплоты, в его работах предвосхищены законы сохранения массы и энергии. М. В. Ломоносов создал фундаментальные труды по истории русского народа, он является основоположником современной русской грамматики.

Крах теории теплорода

В конце XVIII в. вещественная теория теплоты начала сталкиваться со всё бо́льшими и бо́льшими трудностями и к середине XIX в. потерпела полное и окончательное поражение.

Большим числом разнообразных опытов было показано, что сохраняющейся «тепловой жидкости» не существует. Например, при совершении работы силами трения можно получить от двух тел любое количество теплоты; тем большее, чем большее время силы трения совершают работу. В то же время при совершении работы паровой машиной пар охлаждается, и теплота исчезает.

Итак, простая идея о сохранении невесомой жидкости — теплорода оказалась ложной. Но нельзя сказать, что учёные с самого начала стали жертвами грубого, непростительного заблуждения. Сходная мысль о сохранении некой «электрической жидкости», высказанная в начале развития теории электричества, оказалась в общих чертах верной. В неё после открытия дискретного строения электричества и двух знаков электрических зарядов были внесены лишь поправки.

В середине XIX в. опытным путём была доказана эквивалентность механической работы и количества теплоты, переданной телу. Подобно работе, количество теплоты оказалось мерой изменения энергии. Нагревание или охлаждение тела связано не с увеличением или уменьшением в нём количества особой невесомой жидкости, а с увеличением или уменьшением его энергии.

Принцип сохранения теплорода был заменён более общим и глубоким принципом — законом сохранения энергии.

§ 1.4. ТЕРМОДИНАМИКА И МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Термодинамика

Открытие закона сохранения энергии позволило создать во второй половине XIX в. количественную теорию тепловых процессов — термодинамику.

Термодинамика возникла при изучении оптимальных условий использования теплоты для совершения работы задолго до того, как молекулярно-кинетическая теория получила всеобщее признание. (Вещество обладает многими

свойствами, которые можно изучать, не углубляясь в строение вещества.)

Термодинамика — это теория тепловых явлений, в которой не учитывается молекулярное строение тел. Так как в этой теории не вскрывается сущность тепловых процессов, то термодинамику называют феноменологической (описательной) теорией тепла.

В термодинамике тепловые явления описываются с помощью величин, регистрируемых приборами, не способными реагировать на воздействие отдельных молекул (термометр, манометр и др.). *Все законы термодинамики относятся к большим телам, число молекул в которых огромно.* Такие тела в физике называют *макроскопическими*. Энергия макроскопического тела во много раз превышает энергию отдельных молекул. Газ в баллоне, вода в стакане, песчинка, камень, стальной стержень, земной шар (рис. 1.1) — всё это примеры макроскопических тел. Наше тело — это тоже макроскопическое тело.



Рис. 1.1

Тепловые процессы связаны с передачей и превращением энергии. Поэтому основные законы термодинамики относятся к поведению энергии. *Первым законом термодинамики является закон сохранения энергии, распространённый на тепловые явления.*

Во втором законе речь идёт о направлении энергетических превращений: утверждается, что теплота не может быть целиком превращена в работу.

Молекулярно-кинетическая теория

Открытие закона сохранения энергии дало мощный импульс развитию корпускулярной теории тепла, получившей название м о л е к у л я р н о - к и н е т и ч е с к о й   т е о р и и.

В этой теории ставилась задача объяснения всех процессов, происходящих в макроскопических телах, на основе предположения о том, что вещество состоит из атомов и мо-

лекул, движение которых подчиняется законам механики Ньютона.

В конце XIX в. по-прежнему не было прямых экспериментальных доказательств реальности атомов и молекул, хотя многие факты можно было легко объяснить, допустив существование атомов. Учёным, развивавшим молекулярно-кинетическую теорию, пришлось вести длительную борьбу со сторонниками так называемого энергетизма.

Приверженцы энергетизма считали единственной посильной задачей науки описание явлений, доступных непосредственному наблюдению. Попытки привлечения в науку таких неосязаемых объектов, как атомы и молекулы, они полагали недопустимыми. По их мнению, не только получить достоверные сведения о свойствах атомов и молекул, но и доказать экспериментально их существование невозможно. Признавая закон сохранения энергии, эти учёные, по существу, отрывали энергию от её материальных носителей — движущихся атомов и молекул.

Лишь в начале XX в. борьба с энергетизмом завершилась полной победой сторонников молекулярно-кинетической теории. *Была построена последовательная теория поведения больших коллективов атомов и молеку* — статистическая механика (современное название молекулярно-кинетической теории). Справедливость этой теории была доказана многочисленными опытами.

Термодинамика и статистическая механика

После создания статистической механики термодинамика не утратила своего значения. Её общие законы справедливы для всех веществ независимо от их внутреннего строения. С помощью термодинамики сравнительно просто объясняются тепловые явления и выполняются расчёты важных технических устройств, однако при этом многие величины, например теплоёмкости, должны быть определены экспериментально.

Статистическая механика позволяет на основе определённых представлений о строении вещества вычислять теплоёмкости тел и другие величины, которые термодинамика заимствует непосредственно из опыта. Но количественная теория твёрдого и особенно жидкого состояния вещества очень сложна, и не всегда необходимые вычисления могут быть выполнены до конца. В ряде случаев простые расчёты, осно-

ванные на законах термодинамики, оказываются незаменимыми.

В настоящее время в науке и технике с успехом используются оба метода описания тепловых явлений — термодинамический и статистический. Они взаимно дополняют друг друга. Но статистическая механика — более глубокая теория, в которой полностью вскрывается сущность тепловых явлений. Сами законы термодинамики можно обосновать в рамках статистической механики.

?
1. Почему термодинамика является феноменологической теорией тепла?
2. Назовите основные законы термодинамики.
3. Сформулируйте основную задачу молекулярно-кинетической теории.
4. Обоснуйте современное название молекулярно-кинетической теории — статистическая механика.

Напишите эссе «Развитие представлений о природе тепловых явлений».

Глава 2

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Мы начнём с основных положений молекулярно-кинетической теории. Они вам частично известны из предшествующего курса физики. Затем познакомимся с количественной теорией самого простого макроскопического тела — газа.

§ 2.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

«Если бы в результате какой-либо мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались бы уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это — атомная гипотеза (можете называть её не гипотезой, а фактом, но это ничего не меняет): ***все тела состоят из атомов — маленьких телец, которые находятся в беспрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому.***

В одной этой фразе, как вы убедитесь, содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть-чуть соображения».

Приведённое нами высказывание принадлежит выдающемуся американскому физику Р. Фейнману.
Итак, в основе молекулярно-кинетической теории лежат три утверждения, каждое из которых в настоящее время строго доказано экспериментально: вещество состоит из частиц; эти частицы хаотически движутся; частицы взаимодействуют друг с другом.

Доказательства существования молекул

Предположение о том, что все тела состоят из отдельных частиц и, следовательно, ни одно тело нельзя разделить на сколь угодно малые части, высказывалось Демокритом и другими древнегреческими мыслителями ещё за 2500 лет до нашего времени. Качественное объяснение многих явлений с помощью молекулярной теории было дано в XVIII в. Однако бесспорные доказательства существования молекул и атомов удалось получить только в начале XX в. Дело в том, что атомы очень малы. Они не видны не только простым глазом, но и в обычный оптический микроскоп. Именно поэтому все тела кажутся нам сплошными.

Первое убедительное, хотя и косвенное, доказательство существования атомов и молекул было получено английским химиком Д. Дальтоном (1766—1844). Дальтон объяснил закон постоянных отношений. Согласно этому закону при образовании любых химических соединений массы реагирующих веществ находятся в строго определённых отношениях. Так, например, при образовании воды из водорода и кислорода отношение масс прореагировавших газов водорода и кислорода всегда равно 1 : 8. Этот факт становится понятным лишь в том случае, если допустить, что при образовании мельчайшей частички воды — молекулы — некоторое определённое число атомов водорода соединяется с определённым числом атомов кислорода. Молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Поэтому отношение масс водорода и кислорода при образовании воды должно быть равно отношению удвоенной массы атома водорода к массе атома кислорода. Это отношение не может измениться ни при каких условиях.

Мы не будем перечислять все известные сейчас доказательства существования атомов и молекул. В этом нет никакой необходимости. Современные приборы позволяют рассматривать отдельные атомы на поверхностях тел и измерять их размеры. Самый совершенный из них, называемый туннельным микроскопом, был создан в середине

80-х гг. XX в. сотрудниками знаменитой компьютерной фирмы IBM (г. Цюрих) Г. Биннингом и Г. Рорером, удостоенными за его изобретение Нобелевской премии.

Туннельный микроскоп

Саму идею туннельного микроскопа понять не очень сложно. Изготовляется чрезвычайно тонкое вольфрамовое остриё-зонд (рис. 2.1), настолько тонкое, что оно заканчивается одним или несколькими атомами. Остриё почти вплотную подводится к поверхности проводящего электрический ток вещества. При этом электронные облака атома на кончике острия и ближайшего к нему атома поверхности начнут перекрываться. Если приложить небольшое (порядка 0,01 В) напряжение к поверхности и острию, то в зазоре остриё—поверхность появится слабый ток — порядка миллиардных долей ампера. Этот ток называется туннельным. (Его появление объясняется с помощью квантового эффекта, называемого туннельным.) Туннельный ток чрезвычайно сильно зависит от расстояния между зондом и поверхностью. При изменении расстояния на $2 \cdot 10^{-8}$ см (примерно на размер атома) сила тока изменяется в тысячи раз.

Если остриё перемещать вдоль поверхности, то сила тока должна меняться в очень широких пределах, увеличиваясь при прохождении зонда над атомом и уменьшаясь до ничтожных значений, когда зонд зависает над промежутком между атомами поверхности. Это очень неудобно для регистрирующей ток системы, не говоря уже о том, что остриё может просто зацепиться за неровность недостаточно тщательно отшлифованной поверхности. Чтобы избежать этого, используют следующий приём: специальное устройство перемещает зонд по вертикали таким образом, чтобы протекающий через прибор ток оставался неизменным. Это достигается с помощью устройства обратной связи, которое улавливает изменение силы тока и даёт команду приблизить зонд к поверхности или удалить от неё.

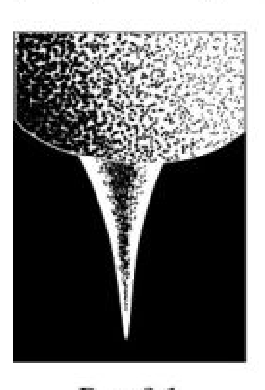


Рис. 2.1

Основная проблема состоит в том, чтобы зонд перемещать контролируемым образом на расстояния в миллиардные доли метра (~1 нм). Это достигается с помощью так называемого пьезоэлектрического манипулятора. Некоторые кристаллы, например кварц, и специальные

керамики слегка меняют свои размеры под действием электрического поля. В этом состоит явление пьезоэлектрического эффекта. Электрические поля создаются тонкими металлическими плёнками, напыляемыми на поверхность керамики. При изменении напряжения на десятые доли вольта размеры керамических стержней меняются приблизительно на размер атома.

Несложная конструкция из трёх взаимно перпендикулярных керамических стержней обеспечивает перемещение острия по всем направлениям (рис. 2.2). Меняющиеся напряжения на стержнях вызывают перемещение острия вдоль параллельных линий, отстоящих друг от друга на заданные расстояния (сканирование). Одновременно происходит перемещение острия по вертикали, обеспечивающее фиксированную силу тока. Полученная информация о перемещениях острия обрабатывается компьютером и подаётся на принтер (печатающее устройство) или непосредственно на экран дисплея, на котором и получается изображение атомов на

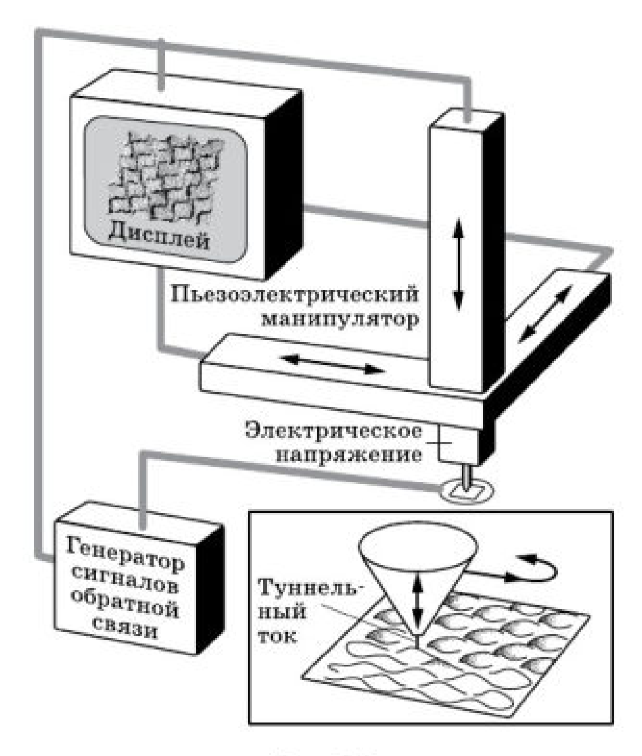


Рис. 2.2

поверхности образца. На рисунке 2.3 показано изображение поверхности графита, полученное в лаборатории кафедры квантовой радиофизики МГУ в 1991 г.

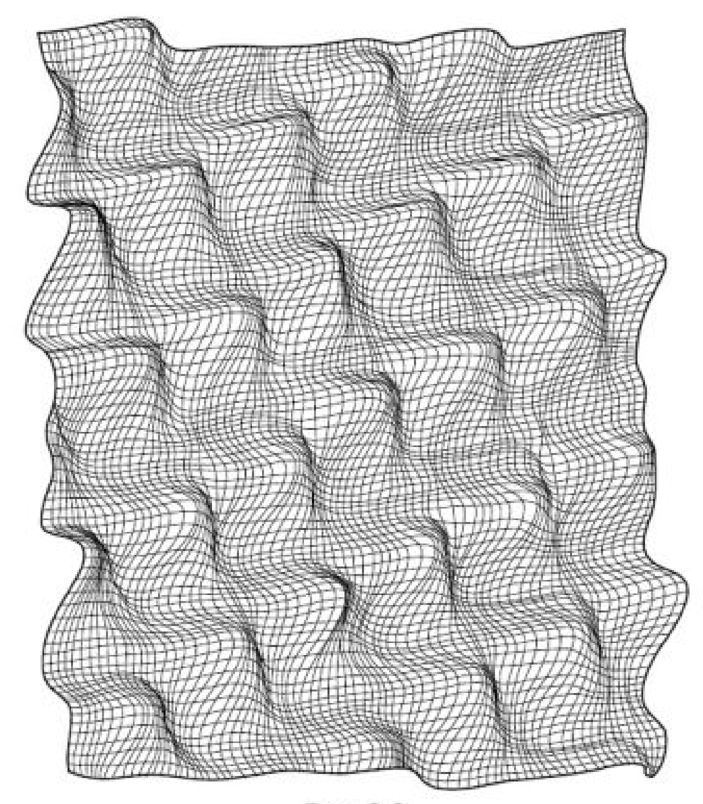


Рис. 2.3

С помощью туннельного микроскопа можно не только получать атомное изображение поверхности, но и перемещать по ней атомы в произвольном направлении. Для этого на очищенную поверхность кристалла никеля напыляют небольшое количество атомов ксенона. Поверхность охлаждается до −269 °С, чтобы исключить заметные перемещения атомов ксенона вследствие теплового движения. Увеличивая напряжение между остриём и никелевой подложкой, можно зацепить на остриё отдельный атом ксенона и перенести его в нужном направлении. Уменьшив затем напряжение, можно отцепить атом и поместить его в любом месте. На рисунке 2.4, сделанном с экрана дисплея, вы видите назва-

ние фирмы IBM, «написанное» 35 атомами ксенона. Размещение отдельных атомов в заданных местах открывает фантастические возможности создания хранилищ информации на атомном уровне. Это уже предел «миниатюризации» хранилищ информации.

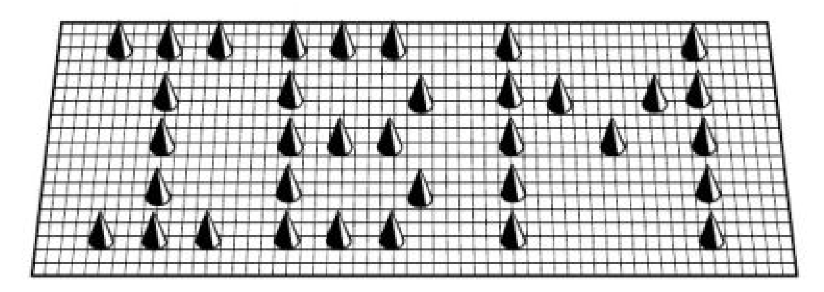


Рис. 2.4

Размеры атомов и молекул

Туннельные микроскопы обеспечивают увеличение в 100 млн раз. Это позволяет измерять размеры атомов с очень большой точностью. Так, диаметр атома углерода оказался равным $1{,}4 \cdot 10^{-8}$ см. Такой же порядок имеют и размеры других атомов.

Размеры атомов и молекул, найденные другими методами, оказываются примерно такими же.

Эти размеры так малы, что их невозможно себе представить. Что вам может сказать, например, число $2{,}3 \cdot 10^{-8}$ см — размер молекулы водорода? В таких случаях прибегают к помощи сравнений. Если, например, вашу голову увеличить до размеров средней звезды типа Солнца, то молекула при этом увеличится до размеров головы.

А вот ещё сравнение. Если представить себе, что все размеры в мире возросли в 10^8 раз, то молекула водорода будет выглядеть как шарик диаметром всего в 2,3 см (средних размеров слива), а рост человека стал бы равным 170 000 км, размер мухи — 10 000 км, толщина волоса — 10 км, размер красного кровяного тельца (эритроцита) — 700 м.

Число молекул

При столь малых размерах молекул число их в любом макроскопическом теле чрезвычайно велико. Подсчитаем приблизительное число молекул в капле воды массой 1 г и,

следовательно, объёмом 1 см^3. Диаметр молекулы воды равен приблизительно $3 \cdot 10^{-8}$ см. Считая, что каждая молекула воды при плотной упаковке молекул занимает объём $(3 \cdot 10^{-8}\ \text{см})^3$, можно найти число молекул в капле, разделив объём капли (1 см^3) на объём, приходящийся на одну молекулу:

$$N = \frac{1\ \text{см}^3}{(3 \cdot 10^{-8})^3\ \text{см}^3} \approx 3{,}7 \cdot 10^{22}.$$

Представьте себе, что поверхность земного шара твёрдая и гладкая. На всей поверхности вплотную друг к другу стоят люди. Число людей при этом будет чуть меньше числа молекул в 1 см^3 воздуха при нормальном атмосферном давлении и температуре 0 °С.

Надо помнить основные положения молекулярно-кинетической теории. Атомы имеют размеры порядка 10^{-8} см. *Изображения атомов, полученные с помощью туннельного микроскопа, не оставляют никаких сомнений в их существовании.*

? **1.** Перечислите основные положения молекулярно-кинетической теории.

2. В чём заключается принципиальное различие между оптическим и туннельным микроскопами?

3. Оцените размер атома.

§ 2.2. МАССА МОЛЕКУЛ. ПОСТОЯННАЯ АВОГАДРО

Массы молекул очень малы, если выражать их в граммах или килограммах, а число молекул в макроскопических телах огромно. С очень маленькими и очень большими числами иметь дело неудобно. Учёные нашли довольно простой способ избежать этого неудобства и характеризовать массы молекул и их число вполне обозримыми числами, не выходящими далеко за пределы сотни. Сейчас вы познакомитесь с тем, как это делается.

Масса молекулы воды

В предыдущем параграфе мы выяснили, что в 1 г воды содержится $3{,}7 \cdot 10^{22}$ молекул. Следовательно, масса одной молекулы равна

$$m_{0H_2O} = \frac{1\ г}{3,7 \cdot 10^{22}} \approx 3 \cdot 10^{-23}\ г.$$

Массы такого же порядка имеют и молекулы других веществ, исключая огромные молекулы органических соединений. Например, масса молекулы гемоглобина превышает массу молекулы воды в несколько десятков тысяч раз.

Относительная молекулярная масса

Так как массы молекул очень малы, удобно использовать не абсолютные значения масс, а относительные. По международному соглашению, принятому в 1961 г., массы всех молекул сравнивают с $\frac{1}{12}$ массы атома углерода* (так называемая углеродная шкала атомных масс). Главная причина выбора углеродной шкалы атомных масс состоит в том, что углерод входит в огромное число различных органических соединений. Этот выбор позволяет очень точно сравнивать массы атомов тяжёлых элементов с массой атома углерода. Множитель $\frac{1}{12}$ введён для того, чтобы относительные массы атомов были близки к целым числам. Относительная масса атома углерода точно равна 12, а атома водорода примерно равна единице.

Относительной молекулярной (или атомной) массой вещества M_r называют отношение массы молекулы (или атома) данного вещества к $\frac{1}{12}$ массы атома углерода m_{0C}:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}. \qquad (2.2.1)$$

Относительные атомные массы всех химических элементов точно измерены. Складывая относительные атомные массы, можно вычислить относительную молекулярную массу. Например, относительная молекулярная масса воды H_2O приближённо равна 18, так как относительные атомные массы водорода и кислорода примерно равны 1 и 16: $2 \cdot 1 + 16 = 18$.

---

* Точнее, с $\frac{1}{12}$ массы атома наиболее распространённого изотопа углерода-12.

Количество вещества

Чем больше атомов или молекул в макроскопическом теле, тем, очевидно, больше вещества содержится в нём. Число молекул в макроскопических телах огромно. Поэтому удобно указывать не абсолютное число атомов, а относительное.

Принято сравнивать число молекул или атомов в данном теле с числом атомов, содержащихся в углероде массой 12 г. Относительное число атомов или молекул в теле характеризуется особой физической величиной, называемой количеством вещества.

Количеством вещества ν называют отношение числа молекул N в данном теле к числу атомов N_A в 12 г углерода*:

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \qquad (2.2.2)$$

Зная количество вещества ν и число N_A, мы тем самым знаем число молекул N в веществе. Количество вещества выражают в молях.

Моль — это количество вещества, содержащего столько же молекул, сколько атомов содержится в углероде массой 12 г.

Если количество вещества равно, например, 2,5 моль, то это означает, что число молекул в теле в 2,5 раза превышает число атомов в 12 г углерода, т. е. равно $2{,}5N_A$.

Постоянная Авогадро

Число молекул или атомов в моле вещества называют постоянной Авогадро. Это название дано в честь итальянского учёного XIX в. А. Авогадро**.

Согласно определению моля постоянная Авогадро одинакова для всех веществ. Она равна, в частности, числу атомов в моле углерода, т. е. в 12 г углерода.

Для вычисления постоянной Авогадро надо найти массу одного атома углерода (или любого другого атома). Грубую оценку массы можно сделать так, как это было выполнено

---

* Если вещество состоит из отдельных атомов, не объединённых в молекулы, то здесь и в дальнейшем под числом молекул надо подразумевать число атомов.

** *А. Авогадро* (1776—1856) — итальянский физик и химик; автор четырёхтомного труда, который был первым руководством по молекулярной физике.

для массы молекулы воды. Наиболее точные методы определения массы основаны на отклонении пучков ионов электромагнитным полем. Измерения дают для массы атома углерода $m_{0C} = 1{,}995 \cdot 10^{-23}$ г. Отсюда постоянная Авогадро равна

$$N_A = \frac{12\ \text{г}}{m_{0C}} \frac{1}{\text{моль}} =$$

$$= \frac{12}{1{,}995 \cdot 10^{-23}} \frac{1}{\text{моль}} = 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1}. \qquad (2.2.3)$$

Наименование моль$^{-1}$ указывает, что N_A — число атомов любого вещества, взятого в количестве одного моля. Если количество вещества $\nu = 2{,}5$ моль, то число молекул в теле $N = \nu N_A = 1{,}5 \cdot 10^{24}$.

Существует много других методов определения постоянной Авогадро, не связанных с нахождением масс атомов. Все они приводят к одним и тем же результатам. Постоянная Авогадро играет важнейшую роль во всей молекулярной физике и является универсальной постоянной.

Огромная величина постоянной Авогадро показывает, насколько малы микроскопические масштабы по сравнению с макроскопическими. Тело, обладающее количеством вещества 1 моль, имеет привычные для нас макроскопические размеры.

Молярная масса

Наряду с относительной молекулярной массой M_r, в физике и химии широко используется понятие молярной массы M.

Молярной массой называют массу вещества, взятого в количестве одного моля.

Согласно этому определению молярная масса равна произведению массы молекулы на постоянную Авогадро:

$$\boxed{M = m_0 N_A.} \qquad (2.2.4)$$

Молярная масса простым образом связана с относительной молекулярной массой. Подставив в формулу (2.2.4) выражения m_0 из (2.2.1) и N_A из (2.2.3), получим

$$M = M_r \frac{m_{0C}}{12} \cdot \frac{12\ \frac{\text{г}}{\text{моль}}}{m_{0C}} = M_r \frac{\text{г}}{\text{моль}} = 10^{-3} \cdot M_r \frac{\text{кг}}{\text{моль}}. \qquad (2.2.5)$$

Например, молярная масса воды H_2O равна 18 г/моль, или 0,18 кг/моль, так как относительная молекулярная масса воды приближённо равна 18.

Масса m произвольного количества вещества ν и молярная масса M связаны соотношением

$$m = m_0N = \nu m_0N_A = \nu M. \quad (2.2.6)$$

Так, масса 3 моль воды равна m = 3 моль · 0,018 кг/моль = = 0,054 кг.

Используя формулы (2.2.6) и (2.2.2), можно получить формулу для числа молекул в теле в зависимости от массы тела m и молярной массы M

$$N = N_A \frac{m}{M}. \quad (2.2.7)$$

Нужно запомнить значение постоянной Авогадро: достаточно знать порядок величины 10^{23}. Столько молекул содержится в 12 г углерода, в 18 г воды и т. д. Формулы (2.2.1), (2.2.2) и (2.2.4) дают определения новых физических величин: относительной молекулярной массе, количеству вещества и молярной массе. Вывести их нельзя, их надо просто запомнить. Остальные формулы можно вывести, и запоминать их необязательно.

? 1. Какую величину называют относительной молекулярной массой вещества?
2. Как определить количество вещества?
3. Поясните физический смысл постоянной Авогадро.
4. Дайте определение понятия «молярная масса».
5. Почему в молекулярно-кинетической теории появилось несколько «масс» — относительная молекулярная, молярная?

§ 2.3. БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Одно из самых очевидных доказательств движения молекул можно получить, наблюдая в микроскоп мельчайшие, взвешенные в воде частицы какого-либо твёрдого вещества. Эти частицы совершают беспорядочное движение, которое называют б р о у н о в с к и м.

Тепловое движение молекул

Движение атомов и молекул мало напоминает движение собаки или автомобиля. Атомы и молекулы вещества совершают движение, в котором трудно усмотреть какой-либо порядок и регулярность. Беспорядочное движение молекул называют **тепловым движением**.

Движение молекул беспорядочно из-за того, что их число в макроскопических телах необозримо велико. Каждая молекула беспрестанно меняет свою скорость при столкновениях с другими молекулами. В результате её траектория оказывается чрезвычайно запутанной, движение — хаотичным, более хаотичным, чем движение щепки в бурлящем потоке воды или муравьёв в разорённом муравейнике.

Беспорядочное движение огромного числа молекул качественно отличается от упорядоченного механического перемещения тел. Оно представляет собой особый вид движения материи со своими особыми свойствами. Об этих свойствах и пойдёт речь в дальнейшем.

Модель броуновского движения

Броуновское движение представляет собой грубое, сильно упрощённое, но глубоко верное отображение теплового движения молекул. Сущность его можно уяснить из следующего простого примера. На столе стоит блюдо, полное живых муравьёв (пример принадлежит немецкому физику Р. Полю). Мы смотрим на блюдо с достаточно большого расстояния, так что глаз не в состоянии различать отдельных снующих насекомых. Нашему взору предстаёт лишённая структуры чёрно-коричневая масса. Увидеть нечто большее позволяет простой приём. Бросим на блюдо несколько хорошо видимых лёгких предметов: обрезков бумаги, пушинок и т. д. Эти предметы не останутся в покое. Они будут беспорядочно двигаться, поворачиваться, так как их толкают и тянут в различные стороны неразличимые для глаза насекомые. Движение пушинок и кусочков бумаги даёт очень упрощённую, грубую картину непрерывного движения муравьёв.

Наблюдение броуновского движения

Подобным образом поступают и при наблюдении теплового движения, только в помощь глазу берут микроскоп. Каплю жидкости, к которой добавлен мелкий нерастворимый порошок, располагают под объективом микроскопа. Анг-



лийский ботаник Р. Броун (1773—1858), наблюдавший это явление в 1827 г., использовал взвешенные в воде споры плауна. Сейчас обычно используют частички краски гуммигут, нерастворимой в воде, или частички туши. Эти частички совершают хаотическое движение. Самым поразительным и непривычным для нас является то, что это движение никогда не прекращается. Внутри закрытой со всех сторон кюветы (во избежание испарения жидкостей) его можно наблюдать днями, месяцами, годами. Оно вечно и самопроизвольно. Интенсивность его возрастает с ростом температуры.

В вулканических породах иногда встречаются капли воды, захваченные при охлаждении пород. Броун обнаружил такие капли в прозрачном кварце. Беспорядочное движение в капле спор и цветочной пыльцы, изолированных от внешнего мира на миллионы лет, заставило Броуна признать, что движение этих частиц не может быть движением живых существ, как он думал первоначально.

Мы привыкли к тому, что любое движущееся тело рано или поздно останавливается. Броуновское движение — тепловое движение, и оно не может прекратиться. По словам французского физика Ж. Перрена, экспериментально исследовавшего броуновское движение, это движение — «точное воспроизведение теплового движения молекул, или, ещё точнее, это настоящее молекулярное движение... При рассматривании этого движения нет принципиальной разницы между молекулами азота, который может быть растворён в воде, и теми видимыми частицами, которые существуют в виде зёрен эмульсии. Беспорядочный характер теплового движения, его неизменность качественно отличают это движение от упорядоченного механического перемещения макроскопических тел».

Красочно описывает броуновское движение Р. Поль. Немногие явления способны так увлечь наблюдателя, как броуновское движение. Здесь наблюдателю позволяется заглянуть за кулисы совершающегося в природе. Перед ним открывается новый мир — безостановочная сутолока огромного числа частиц. Быстро пролетают в поле зрения микроскопа мельчайшие частицы, почти мгновенно меняя направление движения. Медленнее продвигаются более крупные частицы, но и они постоянно меняют направление движения. Большие частицы практически толкутся на месте. Их выступы явно показывают вращение частиц вокруг оси, которая постоянно меняет направление в пространстве. Господство

слепого случая — вот какое сильное, подавляющее впечатление производит эта картина на наблюдателя. Никакое словесное описание не может даже приближённо заменить собственное наблюдение.

На рисунке 2.5, *а* приведена схема движения броуновской частицы. Положения частицы определены через равные промежутки времени — 30 с и соединены прямыми линиями. В действительности траектория частицы гораздо сложнее. На рисунке 2.5, *б* в увеличенном масштабе представлена траектория частицы между точками *A* и *B* при условии, что её положение регистрируется в 100 раз чаще, чем на рисунке 2.5, *а*. Отчётливо видно, что траектория остаётся подобной себе при произвольном увеличении. Подобные геометрические объекты были названы фракталами. Важность этого понятия для физики стала ясна совсем недавно (80-е гг. XX в.).

Броуновское движение можно наблюдать и в газе. Его совершают взвешенные в воздухе частицы пыли или дыма.

На движение пылинок в своё время обратил внимание римский философ и поэт Лукреций Кар (ок. 99—55 до н. э.).

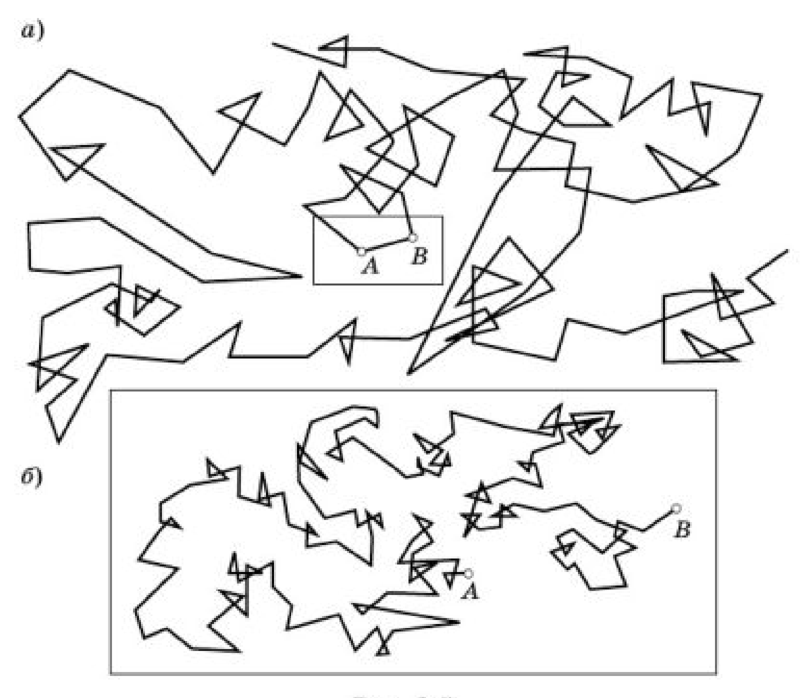


Рис. 2.5

И как это ни удивительно, правильно объяснил его происхождение. В знаменитой поэме «О природе вещей» он писал:

Кроме того, потому обратить тебе надо вниманье
На суматоху в телах, мелькающих в солнечном свете,
Что из неё познаёшь ты материи также движенья,
Происходящие в ней постоянно и скрытно от взора.
Ибо увидишь ты там, как много пылинок меняют
Путь свой от скрытых толчков и опять отлетают обратно,
Всюду туда и сюда разбегаясь во всех направленьях.

Объяснение броуновского движения

Объяснить броуновское движение можно только на основе молекулярно-кинетической теории. Причина броуновского движения частицы состоит в том, что удары молекул жидкости о частицу не компенсируют друг друга. На рисунке 2.6 схематически показано положение одной броуновской частицы и ближайших к ней молекул.

Импульс одной молекулы слишком мал для того, чтобы результат её столкновения с броуновской частицей можно было увидеть под микроскопом. Но если с частицей сталкивается сразу большое количество молекул, случайно движущихся в одном направлении, то они могут вызвать её заметное смещение. Результирующая сила давления, действующая на частицу, оказывается отличной от нуля.

Среднее давление имеет определённое значение как в газе, так и в жидкости. Но возможны незначительные случайные отклонения от среднего. Чем меньше площадь поверхности тела, тем значительнее отклонения силы давления, действующей на данную площадь. Если площадка имеет размеры порядка нескольких диаметров молекулы, то действующая на неё сила меняется скачкообразно от нуля до некоторого конечного значения при попадании молекулы в эту площадку. Количественная теория броуновского движения была разработана А. Эйнштейном (1879—1955) и польским учёным М. Смолуховским (1872—1917) в 1905—1906 гг.

Построение теории броуновского движения и её экспериментальное подтверждение французским учёным Ж. Перреном (1870—1942) окончательно завершили победу молекулярно-кинетической теории.

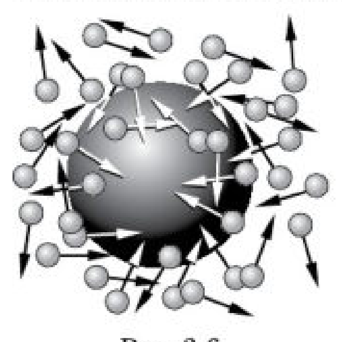


Рис. 2.6

Броуновское движение и измерительные приборы

В настоящее время понятие «броуновское движение» используется в более широком смысле. Например, броуновским движением является дрожание стрелок чувствительных измерительных приборов (крутильных весов Кавендиша для измерения гравитационной постоянной или высокочувствительных гальванометров). Это дрожание происходит из-за теплового движения атомов деталей приборов и окружающей среды. Оно налагает ограничения на возможность повышения чувствительности измерительных приборов при комнатной температуре. Только глубокое охлаждение позволяет увеличить чувствительность приборов.

Очень маленькие, но всё же видимые в микроскоп или даже невооружённым глазом частички вещества в жидкости или газе участвуют в хаотическом тепловом движении молекул. Молекулы движутся ещё более беспорядочно, чем броуновские частицы.

? 1. Охарактеризуйте тепловое движение молекул.
2. Каковы причины броуновского движения частицы?
3. Каким образом броуновское движение влияет на работу измерительных приборов? Приведите примеры.

§ 2.4. СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ

Если молекулы существуют и движутся, то между ними обязательно должны действовать силы. Без такого взаимодействия не было бы ни жидких, ни твёрдых тел.

Молекулярные силы

Доказать существование значительных сил взаимодействия между атомами или молекулами несложно. Попробуйте-ка сломать толстую палку! А ведь она состоит из молекул.

Существование сил притяжения между атомами может доказать такой наглядный опыт. Надо взять два свинцовых бруска и острым ножом срезать тонкие слои с их торцов. При достаточном навыке срезы получаются гладкими и чистыми, свободными от оксидов свинца. Если плотно прижать бруски друг к другу свежими срезами, то они слипнутся. После этого можно один из брусков нагрузить гирей в несколько килограммов, но разрыва брусков не произойдёт. Силы

притяжения между атомами оказываются достаточными, чтобы предотвратить разрыв.

Если бы между молекулами не существовало сил притяжения, то вещество при любых условиях находилось бы в газообразном состоянии. Только благодаря силам притяжения молекулы могут удерживаться около друг друга и образовывать жидкие и твёрдые тела.

Но кроме сил притяжения между молекулами должны действовать силы отталкивания. В том, что между атомами или молекулами при непосредственном их сближении появляются силы отталкивания, убедиться очень просто. Если бы таких сил не существовало, то вы свободно могли бы проткнуть пальцем толстую стальную плиту. Более того, без появления сил отталкивания на очень малых расстояниях между молекулами вещество не могло бы существовать. Молекулы проникли бы друг в друга, и весь кусок вещества сжался бы до объёма одной молекулы.

Представления о существенной роли межмолекулярных сил для описания свойств газов впервые ввёл нидерландский физик Я. Д. Ван-дер-Ваальс (1837—1923). Он не пытался установить точную зависимость сил от расстояния. Ван-дер-Ваальс считал, что на малых расстояниях между молекулами действуют силы отталкивания, которые с увеличением расстояния сменяются силами притяжения, сравнительно медленно убывающими при дальнейшем увеличении расстояния. Силы межмолекулярного взаимодействия часто называют вандерваальсовыми силами.

Электромагнитная природа молекулярных сил

Приступить к теоретическому исследованию молекулярных сил до начала XX в. было почти невозможно. Простые и хорошо изученные гравитационные силы при взаимодействии столь малых тел, как молекулы, явно не могли играть заметной роли. Оставалось предположить, что молекулярные силы имеют электромагнитную природу.

Любой атом и тем более молекула — это сложная система, состоящая из большого числа заряженных частиц: электронов и атомных ядер. Хотя в целом молекулы электрически нейтральны, между ними действуют значительные электрические силы: происходит взаимодействие между электронами и ядрами соседних молекул. Описание движения частиц внутри атомов и молекул — очень сложная задача. Её рассматривают в атомной физике и решают с помощью законов

квантовой механики. Мы ограничимся качественным рассмотрением межмолекулярных сил различных типов и потом приведём конечный результат: примерную зависимость сил взаимодействия двух молекул от расстояния между ними.

Ориентационные силы

У многих молекул, например у молекулы воды, распределение положительных и отрицательных зарядов таково, что в среднем центры этих зарядов не совпадают. Такую молекулу приближённо можно рассматривать как совокупность двух точечных зарядов $+q$ и $-q$ на небольшом расстоянии l друг от друга (рис. 2.7). Эта система зарядов называется электрическим диполем*. Электрические свойства такой молекулы характеризуются дипольным моментом

$$p = ql, \tag{2.4.1}$$

где q — абсолютное значение заряда.

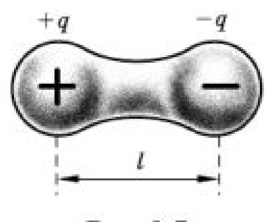


Рис. 2.7

Рассчитывать значения дипольных моментов молекул на первых порах не умели. До создания квантовой механики это вообще было невозможно.

Но если считать дипольные моменты p_1 и p_2 двух молекул известными, то зависимость силы взаимодействия между ними от расстояния можно вычислить. Для этого нужно только знать закон взаимодействия двух точечных электрических зарядов. Этот закон (закон Кулона) уже давно был известен. Сила притяжения двух диполей максимальна, когда они располагаются вдоль одной линии (рис. 2.8). Эта сила возникает из-за того, что расстояние между разноимёнными зарядами, находящимися в точках *2* и *3*, чуть меньше, чем между одноимёнными, расположенными в точках *1*, *3* и *2*, *4*.

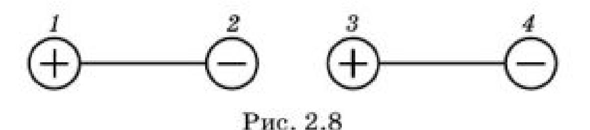


Рис. 2.8

---

* Подробнее об электрических диполях будет рассказано в дальнейшем.

Сила взаимодействия диполей зависит от их взаимной ориентации. Поэтому она называется ориентационной. Хаотическое тепловое движение непрерывно меняет ориентацию молекул-диполей. Учитывая это, силу взаимодействия диполей нужно вычислять как среднюю по всевозможным ориентациям. Расчёты приводят к следующему результату: сила притяжения пропорциональна произведению дипольных моментов p_1 и p_2 молекул и обратно пропорциональна расстоянию между ними в седьмой степени:

$$F_{\text{ор}} \sim \frac{p_1 p_2}{r^7}. \qquad (2.4.2)$$

Это очень быстрое убывание по сравнению с силой взаимодействия точечных заряженных частиц, которая пропорциональна $\frac{1}{r^2}$.

Индукционные (поляризационные) силы

Можно указать ещё одно достаточно простое взаимодействие молекул. Оно возникает между двумя молекулами, одна из которых обладает дипольным моментом, а другая — нет.

Дипольная молекула создаёт электрическое поле, которое поляризует молекулу с электрическими зарядами, равномерно распределёнными по объёму. Положительные заряды смещаются по направлению линий напряжённости электрического поля, а отрицательные — против. В результате неполярная молекула растягивается (поляризуется) и у неё возникает дипольный момент (рис. 2.9).

Силу взаимодействия можно рассчитать и в этом случае. Она пропорциональна дипольному моменту p полярной молекулы, некоторой величине α, характеризующей способность неполярной молекулы поляризоваться (она называется поляризуемостью), и обратно пропорциональна седьмой степени расстояния между молекулами:

$$F_{\text{и}} \sim \frac{p\alpha}{r^7}. \qquad (2.4.3)$$



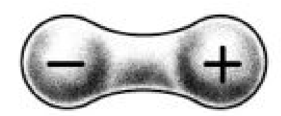


Рис. 2.9

Эти силы притяжения называются индукционными или поляризационными, так как они возникают благодаря поляризации молекул, вызванной электростатической индукцией.

Дисперсионные силы

Хорошо известно, что силы притяжения существуют и между неполярными молекулами. Например, атомы инертных газов не имеют дипольного момента, но тем не менее притягиваются друг к другу.

Качественно и очень приближённо появление этих сил можно объяснить так. В атомах и молекулах электроны каким-то сложным образом движутся вокруг ядер, и в среднем по времени дипольные моменты молекул могут оказаться равными нулю. Но в каждый момент времени электроны занимают какое-то определённое положение. Поэтому мгновенное значение дипольного момента отлично от нуля. Такой «мгновенный» диполь создаёт поле, поляризующее соседние неполярные атомы. Из-за этого «мгновенные» диполи начинают взаимодействовать друг с другом. Полная сила взаимодействия между неполярными молекулами есть средний результат взаимодействия всевозможных «мгновенных» диполей.

Расчёт, выполненный в рамках квантовой механики, приводит к выводу, что сила взаимодействия в этом случае пропорциональна произведению поляризуемостей молекул α_1 и α_2 и обратно пропорциональна седьмой степени расстояния:

$$F_{д} \sim \frac{\alpha_1 \alpha_2}{r^7}. \qquad (2.4.4)$$

Эти силы называются дисперсионными, потому что дисперсия света (зависимость показателя преломления вещества от частоты света) определяется теми же свойствами молекул, что и рассмотренные силы.

Дисперсионные силы действуют между всеми атомами и молекулами, так как механизм их проявления не зависит от того, есть ли у них постоянные дипольные моменты или нет. Обычно эти силы превосходят как ориентационные, так и индукционные силы. Только при взаимодействии молекул с большими дипольными моментами, например молекул воды, ориентационная сила оказывается больше дисперси-

онной (для молекул воды в 3 раза). При взаимодействии же таких полярных молекул, как CO, HCl, дисперсионные силы в десятки и сотни раз превосходят другие силы.

Существенно, что все три типа сил притяжения одинаковым образом убывают с расстоянием пропорционально $\frac{1}{r^7}$. Впрочем, на расстояниях, в несколько раз бóльших размеров молекул, начинает сказываться конечность скорости распространения электромагнитных взаимодействий. Из-за этого на расстояниях порядка 10^{-5} см силы притяжения начинают убывать уже как $\frac{1}{r^8}$.

Силы отталкивания

Теперь обратим внимание на силы отталкивания, действующие между молекулами на очень малых расстояниях. С одной стороны, ситуация здесь проще, а с другой — сложнее. Проще в том смысле, что эти силы очень быстро возрастают при сближении молекул, и поэтому та или иная быстрота изменения силы с расстоянием не оказывает заметного влияния на течение любых процессов.

Сложность состоит в том, что силы отталкивания в значительно большей мере, чем силы притяжения, зависят от индивидуальности молекул. Зная, как молекула A отталкивает молекулы B и C, мы ещё не в состоянии судить, какие силы отталкивания будут действовать между молекулами B и C. При непосредственном сближении молекул их электронные оболочки начинают перекрываться и особенность строения молекул сказывается в большей степени, чем при больших расстояниях между ними.

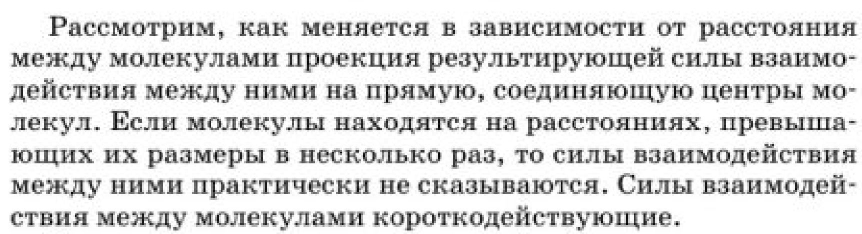
К достаточно хорошим результатам приводит допущение, что силы отталкивания возрастают при сближении молекул по закону

$$F_{от} \sim \frac{1}{r^{13}}. \qquad (2.4.5)$$

Учитывая, что силы притяжения с уменьшением расстояния увеличиваются пропорционально $\frac{1}{r^7}$, а силы отталкивания — пропорционально $\frac{1}{r^{13}}$, можно примерную зависимость сил от расстояния изобразить графически.

График зависимости молекулярных сил от расстояния между молекулами





Рассмотрим, как меняется в зависимости от расстояния между молекулами проекция результирующей силы взаимодействия между ними на прямую, соединяющую центры молекул. Если молекулы находятся на расстояниях, превышающих их размеры в несколько раз, то силы взаимодействия между ними практически не сказываются. Силы взаимодействия между молекулами короткодействующие.

На расстояниях, превышающих 2—3 диаметра молекул, сила отталкивания практически равна нулю. Заметна лишь сила притяжения. По мере уменьшения расстояния сила притяжения возрастает и одновременно начинает сказываться сила отталкивания. Эта сила очень быстро увеличивается, когда электронные оболочки молекул начинают перекрываться.

На рисунке 2.10 графически изображена зависимость проекции F_r силы взаимодействия молекул от расстояния между их центрами. На расстоянии r_0, примерно равном сумме радиусов молекул, $F_r = 0$, так как сила притяжения равна по модулю силе отталкивания. При $r > r_0$ между молекулами действует сила притяжения. Проекция силы, действующей на правую молекулу, отрицательна. При $r < r_0$ действует сила отталкивания с положительным значением проекции F_r.

Происхождение сил упругости

Зависимость сил взаимодействия молекул от расстояния между ними объясняет появление силы упругости при сжатии и растяжении тел. Если пытаться сблизить молекулы на

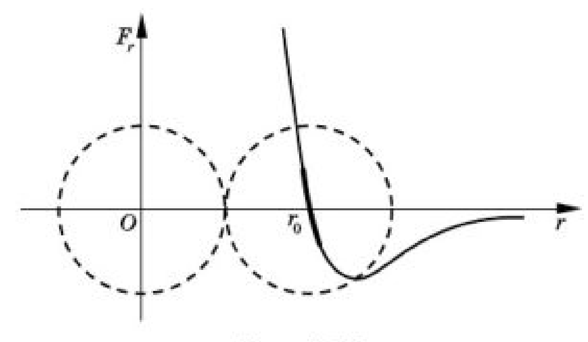


Рис. 2.10

расстояние, меньшее r_0, то начинает действовать сила, препятствующая сближению. Наоборот, при удалении молекул друг от друга действует сила притяжения, возвращающая молекулы в исходные положения после прекращения внешнего воздействия.

При малом смещении молекул из положений равновесия силы притяжения или отталкивания растут линейно с увеличением смещения. На малом участке кривую можно считать отрезком прямой (утолщённый участок кривой на рис. 2.10). Именно поэтому при малых деформациях оказывается справедливым закон Гука, согласно которому сила упругости пропорциональна деформации. При больших смещениях молекул закон Гука уже несправедлив.

Так как при деформации тела изменяются расстояния между всеми молекулами, то на долю соседних слоёв молекул приходится незначительная часть общей деформации. Поэтому закон Гука выполняется при деформациях, в миллионы раз превышающих размеры молекул.

Атомно-силовой микроскоп

На действии сил отталкивания между атомами и молекулами на малых расстояниях основано устройство атомно-силового микроскопа (АСМ). Этот микроскоп, в отличие от туннельного, позволяет получать изображения не проводящих электрический ток поверхностей. Вместо вольфрамового острия в АСМ используют маленький осколок алмаза, заострённый до атомных размеров. Этот осколок закрепляется на тонком металлическом держателе. При сближении острия с исследуемой поверхностью электронные облака атомов алмаза и поверхности начинают перекрываться и возникают силы отталкивания. Эти силы отклоняют кончик алмазного острия. Отклонение регистрируется с помощью лазерного луча, отражающегося от зеркальца, закреплённого на держателе. Отражённый луч приводит в действие пьезоэлектрический манипулятор, аналогичный манипулятору туннельного микроскопа. Механизм обратной связи обеспечивает такую высоту алмазной иглы над поверхностью, чтобы изгиб пластины держателя оставался неизменным.

На рисунке 2.11 вы видите изображение полимерных цепей аминокислоты аланина, полученное с помощью АСМ. Каждый бугорок представляет собой одну молекулу аминокислоты.

В настоящее время сконструированы атомные микроскопы, устройство которых основано на действии моле-

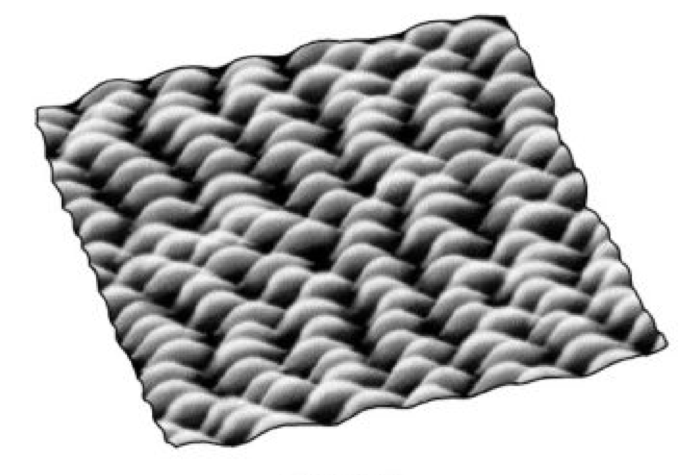


Рис. 2.11

кулярных сил притяжения на расстояниях, в несколько раз превышающих размеры атома. Эти силы примерно в 1000 раз меньше сил отталкивания в АСМ. Поэтому применяется более сложная чувствительная система для регистрации сил.

Атомы и молекулы состоят из электрически заряженных частиц. Благодаря действию электрических сил на малых расстояниях молекулы притягиваются, но начинают отталкиваться, когда электронные оболочки атомов перекрываются.

? **1.** Какова природа молекулярных сил?

2. Назовите типы молекулярных сил. Какие основания положены в основу выделения различных типов молекулярных сил?

3. Поясните по графику (см. рис. 2.10) зависимость проекции силы взаимодействия молекул от расстояния между их центрами.

§ 2.5. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ

При изучении поведения большой совокупности молекул вместо силы взаимодействия молекул удобнее пользоваться потенциальной энергией.
Нужно вычислять средние характеристики системы, а понятие средней силы взаимодействия молекул лише-

но смысла, так как сумма всех сил, действующих между молекулами, в соответствии с третьим законом Ньютона равна нулю. Средняя же потенциальная энергия в существенной мере определяет состояние и свойства вещества.

Зависимость потенциальной энергии от расстояния между молекулами

Так как изменение потенциальной энергии определяется работой силы, то по известной зависимости силы от расстояния можно найти зависимость от расстояния потенциальной энергии. Но нам достаточно знать лишь примерный вид потенциальной кривой $E_p(r)$. Прежде всего вспомним, что потенциальная энергия определяется с точностью до произвольной постоянной, потому что непосредственный смысл имеет не сама потенциальная энергия, а разность потенциальных энергий в двух точках, равная работе, взятой с противоположным знаком. Будем считать, как принято в физике, $E_p = 0$ при $r \to \infty$. Потенциальную энергию системы можно рассматривать как работу, которую система может совершить, причём потенциальная энергия определяется расположением тел, но не их скоростями. Чем больше расстояние между молекулами, тем бóльшую работу совершат силы притяжения между ними при их сближении. Поэтому при уменьшении r, начиная от очень больших значений, потенциальная энергия будет уменьшаться. Мы приняли, что при $r \to \infty$ потенциальная энергия равна нулю, следовательно, при уменьшении r потенциальная энергия становится отрицательной (рис. 2.12).

В точке $r = r_0$ сила равна нулю (см. рис. 2.10). Поэтому если молекулы расположены на этом расстоянии, то они будут покоиться, и никакую работу система совершать не может. Это означает, что при $r = r_0$ потенциальная энергия имеет минимум. Мы могли бы это значение потенциальной энергии E_{p0} принять за начало отсчёта потенциальной энергии. Тогда она была бы всюду положительной (рис. 2.13). Обе кривые (см. рис. 2.12 и 2.13) одинаково характеризуют взаимодействие молекул. Разность значений E_p для двух точек одинакова у обеих кривых, а только она и имеет смысл.

При $r < r_0$ появляются быстро растущие силы отталкивания. Они также могут совершать работу. Поэтому потенциальная энергия при дальнейшем сближении молекул растёт, причём очень быстро.

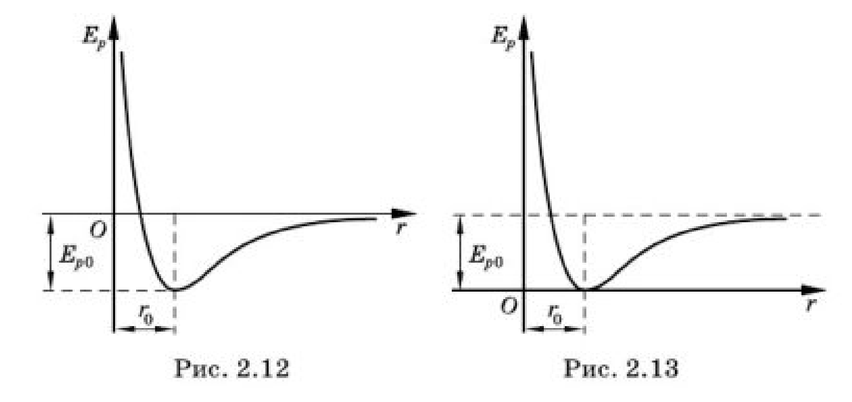


Рис. 2.12 Рис. 2.13

Потенциальная кривая будет иметь форму, изображённую на рисунке 2.12, если молекулы сближаются в плоскости *A* вдоль линии, соединяющей их центры (рис. 2.14). Если же молекулы сближаются в плоскости *B* или в плоскости *C*, то потенциальная кривая будет иметь вид, показанный соответственно на рисунках 2.15, *а* и 2.15, *б*.

Главная задача

Можно многое объяснить и понять, исходя из определённых представлений о характере взаимодействия молекул в веществе. Мы остановимся только на одном очень общем вопросе: каким образом знание зависимости потенциальной энергии от расстояния между молекулами позволяет устано-

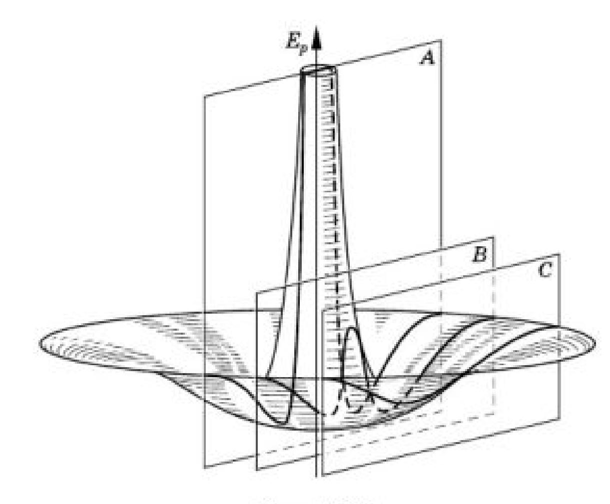


Рис. 2.14

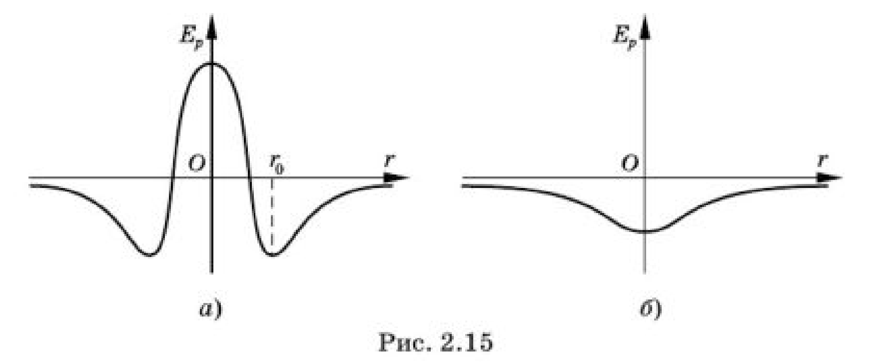


Рис. 2.15

вить количественный критерий различия между газами, жидкостями и твёрдыми телами с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

Предварительно рассмотрим движение молекул с энергетической точки зрения.

Движение частицы в пространстве с заданной потенциальной энергией

Зная зависимость потенциальной энергии от расстояния, можно установить характер движения тела, используя лишь закон сохранения энергии.

Пусть одна из молекул неподвижна, и мы рассматриваем движение другой молекулы. Характер движения молекулы зависит от её полной энергии E. Согласно закону сохранения энергии полная энергия молекулы остаётся постоянной:

$$E = E_k + E_p, \tag{2.5.1}$$

где E_k и E_p — соответственно кинетическая и потенциальная энергии молекулы.

Рассмотрим вначале случай, когда $E = E_1 > 0$ (рис. 2.16). Полную энергию можно характеризовать прямой, параллельной оси r, так как при любых r она имеет одно и то же значение. При движении молекулы вдоль оси r её кинетическая и потенциальная энергии непрерывно изменяются: чем больше потенциальная энергия, тем меньше кинетическая и наоборот. Если частица движется справа налево, то её кинетическая энергия растёт и в точке $r = r_0$ (минимум потенциальной энергии) достигает максимума. С дальнейшим уменьшением r кинетическая энергия начинает убывать. В точке $r = r_1$ кинетическая энергия равна нулю, так как

в этой точке полная энергия равна потенциальной. Попасть в область, где $r < r_1$, частица не может, так как при этом её положительная потенциальная энергия оказалась бы больше полной энергии и, следовательно, кинетическая энергия сделалась бы отрицательной. Но кинетическая энергия всегда положительна.

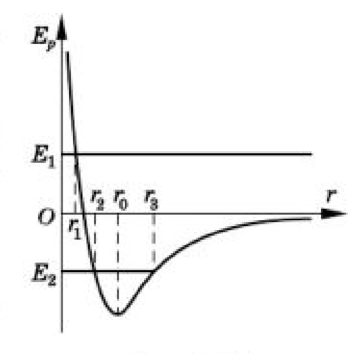


Рис. 2.16

В точке $r = r_1$ частица останавливается и начинает двигаться назад, ибо на неё действует сила отталкивания. Эта точка называется **точкой поворота**. В дальнейшем молекула движется в положительном направлении оси r и уходит в бесконечность.

Совершенно иная картина будет наблюдаться при $E = E_2 < 0$ (см. рис. 2.16). В этом случае молекула находится в потенциальной яме и не может из неё выйти. В точках поворота r_2 и r_3 кинетическая энергия равна нулю. Возникает так называемое **связанное состояние**: молекулы совершают колебания около друг друга.

Разделение системы на две независимые частицы невозможно без увеличения полной энергии до $E > 0$.

Располагая графиком зависимости силы взаимодействия между молекулами от расстояния, можно установить, как зависит от расстояния потенциальная энергия. Зная зависимость потенциальной энергии от расстояния, можно выяснить характер движения молекул относительно друг друга.

? **1.** Почему при исследовании поведения большой совокупности молекул пользуются не силовыми характеристиками, а энергетическими?

2. Изобразите график зависимости потенциальной энергии взаимодействия между молекулами от расстояния между ними.

3. Используя график на рисунке 2.16, охарактеризуйте движение молекул относительно друг друга.

4. Что является основанием количественного критерия различия между газами, жидкостями и твёрдыми телами с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

5. Каким образом, зная график зависимости силы взаимодействия между молекулами от расстояния, можно установить, как зависит от расстояния потенциальная энергия?

§ 2.6. СТРОЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ, ЖИДКИХ И ТВЁРДЫХ ТЕЛ



Молекулярно-кинетическая теория даёт возможность понять, почему вещество может находиться в газообразном, жидком и твёрдом состояниях.

Если в самых общих чертах попробовать представить себе строение газов, жидкостей и твёрдых тел, то можно нарисовать следующую картину.

Газы

В газах расстояние между атомами или молекулами в среднем во много раз превышает размеры самих молекул (рис. 2.17). При атмосферном давлении объём сосуда в десятки тысяч раз превышает объём находящихся в сосуде молекул газа.

Газы легко сжимаются, так как при сжатии газа уменьшается лишь среднее расстояние между молекулами, но молекулы не «сдавливают» друг друга (рис. 2.18). Молекулы (или атомы) стремительно, как бегуны-спринтеры, но значительно быстрее проносятся в пространстве. Сталкиваясь друг с другом, они непрерывно изменяют направление своего движения и разлетаются в разные стороны.

Слабые силы притяжения молекул газа не способны удержать их около друг друга. Поэтому газы не сохраняют ни формы, ни объёма. Как бы мы ни увеличивали размеры со-

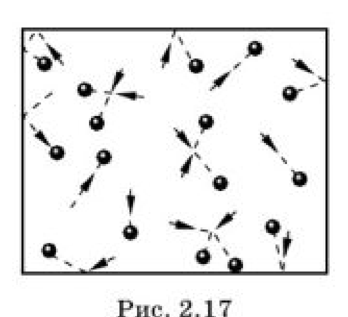


Рис. 2.17

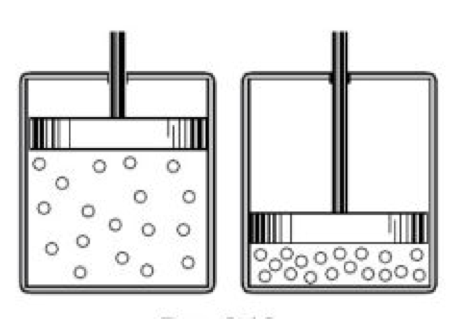


Рис. 2.18

суда, содержащего газ, последний заполнит его целиком без каких-либо усилий с нашей стороны.

Многочисленные удары молекул о стенки сосуда создают давление газа.

Можно получить более глубокое представление о состоянии вещества, называемого реальным газом, если проследить за характером зависимости потенциальной энергии одной из молекул от расстояния до её ближайших соседей (рис. 2.19). При перемещении молекулы её потенциальная энергия на большей части пути почти точно равна нулю, так как расстояние между молекулами в газе в среднем гораздо больше их размеров. В точках *1* и *2* расположены ближайшие соседи рассматриваемой молекулы. Данная молекула проходит на довольно значительном расстоянии от соседа *1* и на более близком от соседа *2*.

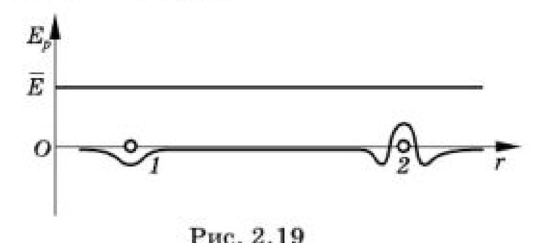


Рис. 2.19

Средняя по координате потенциальная энергия молекулы отрицательна и очень мала. По модулю она численно равна площади фигуры, ограниченной потенциальной кривой между точками *1* и *2* и осью r, делённой на длину отрезка *1—2* (среднее значение потенциальной энергии на отрезке *1—2*). Полная средняя энергия обязательно больше нуля (прямая на рис. 2.19), так как при $E < 0$ мы имели бы связанное состояние молекул. Неравенство $E > 0$ возможно лишь при условии, что средняя кинетическая энергия молекулы газа больше среднего значения её потенциальной энергии

$$\bar{E}_k > |\bar{E}_p|, \qquad (2.6.1)$$

так как $\bar{E} = \bar{E}_k + \bar{E}_p$, а $\bar{E}_p < 0$.

Жидкости

Молекулы жидкости расположены почти вплотную друг к другу (рис. 2.20), поэтому каждая молекула ведёт себя иначе, чем молекула газа. Зажатая, как в клетке, другими молекулами, она совершает «бег на месте» (колеблется около по-

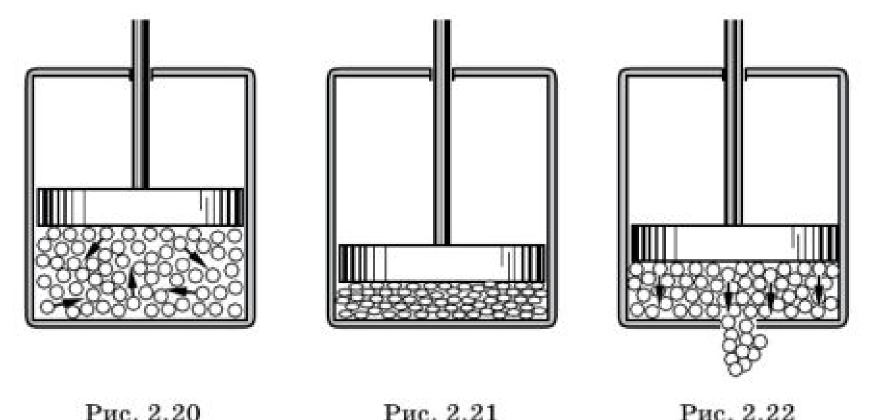


Рис. 2.20 Рис. 2.21 Рис. 2.22

ложения равновесия, сталкиваясь с соседними молекулами). Лишь время от времени она совершает «прыжок», прорываясь сквозь «прутья клетки», но тут же попадает в новую «клетку», образованную новыми соседями. Время оседлой жизни молекулы воды, т. е. время колебаний около одного определённого положения равновесия, при комнатной температуре, как показывают расчёты, выполненные с применением законов статистической механики, равно в среднем 10^{-11} с. Время же, за которое совершается одно колебание, значительно меньше (10^{-12}—10^{-13} с). С повышением температуры время оседлой жизни молекул уменьшается. Характер молекулярного движения в жидкостях, впервые установленный советским физиком Я. И. Френкелем, позволяет понять основные свойства жидкостей.



Френкель Яков Ильич (1894—1952) — выдающийся советский физик-теоретик, внёсший значительный вклад в самые различные области физики. Я. И. Френкель — автор современной теории жидкого состояния вещества. Им заложены основы теории ферромагнетизма. Широко известны работы Я. И. Френкеля по атмосферному электричеству и происхождению магнитного поля Земли. Первая количественная теория деления ядер урана создана Я. И. Френкелем.

Молекулы жидкости находятся непосредственно друг возле друга. Поэтому при попытке изменить объём жидкости даже на малую величину начинается деформация самих молекул (рис. 2.21). Для этого нужны очень большие силы. Этим и объясняется малая сжимаемость жидкостей. Понять причину малой сжимаемости жидкости ничуть не сложнее, чем понять, почему так трудно втиснуться в переполненный автобус.

Жидкости, как известно, текучи, т. е. не сохраняют своей формы. Объяснить это можно так. Если жидкость неподвижна, то перескоки молекул из одного оседлого положения в другое происходят с одинаковой частотой по всем направлениям (см. рис. 2.20). Наличие внешней силы заметно не изменяет числа перескоков молекул в секунду, но перескоки молекул из одного оседлого положения в другое при этом происходят преимущественно в направлении действия внешней силы (рис. 2.22). Вот почему жидкость течёт и принимает форму сосуда.

Для течения жидкости необходимо только, чтобы время действия силы было во много раз больше времени оседлой жизни молекулы, иначе кратковременная сила вызовет лишь упругую деформацию жидкости, и обычная капля воды поведёт себя, как стальной шарик.

Теперь рассмотрим, как связаны средняя кинетическая и средняя потенциальная энергии молекулы жидкости. Каждая молекула жидкости взаимодействует сразу с несколькими соседями. Ограничимся учётом взаимодействия данной молекулы с двумя ближайшими соседями, находящимися примерно на расстоянии $2r_0$ друг от друга.

Искомую потенциальную кривую можно получить наложением кривой, изображённой на рисунке 2.15, *а* (парное взаимодействие), на такую же кривую, смещённую относительно первой на расстояние чуть большее $2r_0$. Потенциальные энергии складываются, поэтому глубина потенциальной ямы увеличивается почти вдвое, а максимумы энергии уменьшаются (рис. 2.23). Ход потенциальной кривой с учётом взаимодействия с другими молекулами показан на рисунке 2.24.

Для того чтобы молекула не могла покинуть жидкость, её средняя энергия должна быть отрицательной ($\bar{E} < 0$). Только в этом случае молекула останется внутри потенциальной ямы, образованной её соседями. Если $\bar{E} > 0$, то молекула не удержится внутри жидкости и покинет её.

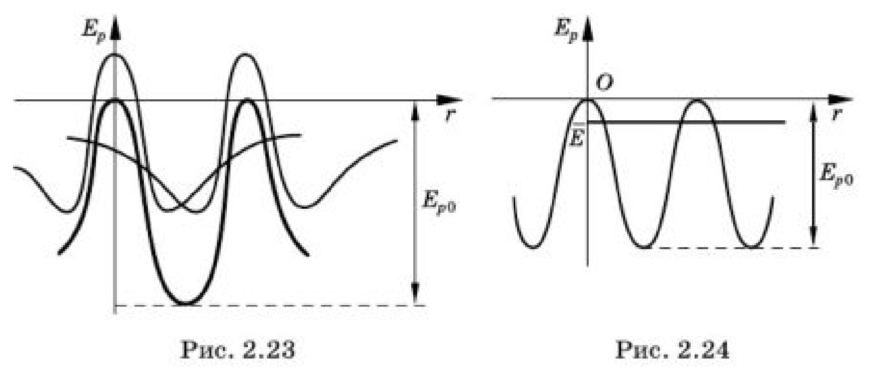


Рис. 2.23 Рис. 2.24

Так как $\bar{E} = \bar{E}_k + \bar{E}_p$ и $\bar{E}_p < 0$, то средняя кинетическая энергия молекулы жидкости меньше абсолютного значения средней потенциальной энергии: $\bar{E}_k < |\bar{E}_p|$, причём лишь незначительно меньше:

$$\bar{E}_k \lesssim |\bar{E}_p|. \qquad (2.6.2)$$

Поэтому $|\bar{E}| \ll |E_{p0}|$ — максимального (по модулю) значения потенциальной энергии. На рисунке 2.24 график средней энергии молекулы изображён отрезком прямой.

Колебания молекулы в потенциальной яме не продолжаются долго. Из-за хаотичности движения молекул их энергия непрерывно меняется и становится то больше, то меньше средней энергии $\bar{E}$. Как только энергия молекулы превысит высоту потенциальной кривой (высоту потенциального барьера), отделяющей одну яму от другой, молекула перескочит из одного положения равновесия в другое.

Твёрдые тела

Атомы или молекулы твёрдых тел в отличие от жидкостей не могут разорвать свои связи с ближайшими соседями и колеблются около определённых положений равновесия. Правда, иногда молекулы изменяют положение равновесия, но происходит это крайне редко. Вот почему твёрдые тела сохраняют не только объём, но и форму.

Есть ещё одно различие между жидкими и твёрдыми телами. Жидкость можно сравнить с толпой, в которой люди беспокойно толкутся на месте, а твёрдое тело, как правило, подобно стройной когорте, где люди хотя и не стоят по стойке

«смирно», но выдерживают между собой в среднем определённые интервалы. Если соединить центры положений равновесия атомов или молекул твёрдого тела, то получится правильная пространственная решётка, называемая кристаллической. На рисунках 2.25 и 2.26 показаны кристаллические решётки поваренной соли и алмаза*.

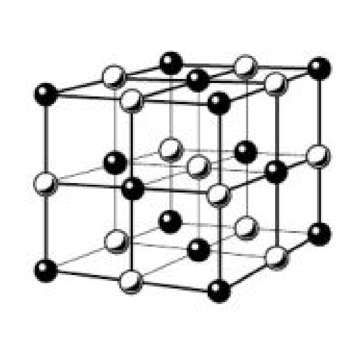


Рис. 2.25

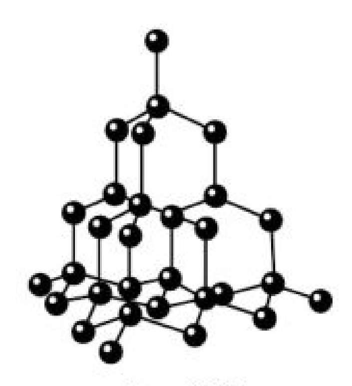


Рис. 2.26

Если кристаллу не мешают расти, то внутренний порядок в расположении атомов приводит к геометрически правильным внешним формам.

Кривая потенциальной энергии взаимодействия молекулы твёрдого тела со своими ближайшими соседями (рис. 2.27) похожа на кривую потенциальной энергии взаимодействия молекул жидкости (см. рис. 2.24). Только глубина потенциальной ямы должна быть несколько больше, так как молекулы расположены ближе друг к другу. Условие $|\bar{E}| < |E_{p0}|$, выполняемое для жидких тел, выполняется и для твёрдых. Но кинетическая энергия молекул твёрдого тела значительно меньше, чем молекул жидкости. Ведь твёрдые тела образуются при охлаждении.

Соответственно в твёрдых телах средняя кинетическая энергия молекул значительно меньше абсолютного значения средней потенциальной энергии:

$$\bar{E}_k \ll |\bar{E}_p|. \qquad (2.6.3)$$

---

* В действительности размеры атомов (или ионов) сравнимы с расстояниями между узлами кристаллической решётки, так что атомы почти соприкасаются друг с другом. На рисунках 2.25 и 2.26 их размеры сознательно уменьшены, для того чтобы была видна кристаллическая решётка.

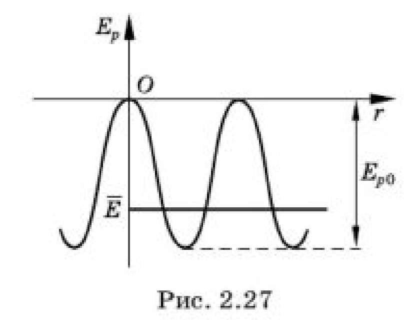


Рис. 2.27

На рисунке 2.27 средняя энергия молекулы внутри ямы изображена отрезком прямой. Частица совершает колебания у дна потенциальной ямы. Высóты потенциальных барьеров между соседними ямами велики, и молекулы почти не перемещаются из одного положения равновесия в другое. Для перемещения молекула должна получить энергию, значительно превышающую среднюю. Это событие маловероятно. Вот почему твёрдые тела в отличие от жидкостей сохраняют свою форму.

У газов средняя кинетическая энергия молекул больше средней потенциальной энергии. У жидкостей средняя кинетическая энергия немного меньше средней потенциальной, у твёрдых тел средняя кинетическая энергия много меньше средней потенциальной.

? 1. Назовите агрегатные состояния вещества.
2. Охарактеризуйте свойства вещества в различных агрегатных состояниях с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Ответ представьте в виде таблицы.
3. Изобразите и объясните «потенциальные кривые» для различных агрегатных состояний.

§ 2.7. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении большей части задач на тему «Основы молекулярно-кинетической теории» нужно уметь определять молярные массы вещества. Для этого по известным из таблицы Д. И. Менделеева относительным атомным массам надо определить относительную молекулярную массу, а затем и молярную массу по формуле $M = 10^{-3}M_r$ кг/моль, где M — молярная масса, M_r — относительная молекулярная масса.

Во многих задачах требуется по известной массе тела определить количество вещества или число атомов (молекул) в нём. Для этого используют формулы $\nu = \frac{m}{M}$ и $N = \frac{m}{M}N_A$.

Массы отдельных молекул определяются по формуле $m_0 = \frac{M}{N_A}$. В некоторых задачах массу вещества нужно выразить через его плотность ρ и объём V: $m = \rho V$.

Задача 1

В двух сосудах находятся вода и ртуть одинакового объёма. Сравните число атомов в этих жидкостях.

Решение. Вода содержит $N = \frac{m_1}{M_1}N_A$ молекул или $N_1 = \frac{3m_1}{M_1}N_A$ атомов, а ртуть содержит $N_2 = \frac{m_2}{M_2}N_A$ атомов.

Масса воды $m_1 = \rho_1 V$; масса ртути $m_2 = \rho_2 V$, где $\rho_1 = 1000$ кг/м^3 — плотность воды, а $\rho_2 = 13\,600$ кг/м^3 — плотность ртути. Молярная масса воды $M_1 = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; молярная масса ртути $M_2 = 0{,}2006$ кг/моль. Следовательно,

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{3\rho_1 V N_A M_2}{M_1 \rho_2 V N_A} = \frac{3 \cdot 1000 \cdot 0{,}2006}{18 \cdot 10^{-3} \cdot 13\,600} \approx 2{,}5.$$

Число атомов в воде примерно в 2,5 раз больше, чем в ртути.

Задача 2

Определите среднее расстояние d между центрами соседних молекул в куске льда. Плотность льда $\rho = 900$ кг/м^3.

Решение. При плотной упаковке молекул среднее расстояние d между центрами соседних молекул равно линейным размерам самих молекул. Поэтому

$$V \approx d^3 N,$$

где V — объём куска льда, а N — число молекул в нём.

Согласно (2.2.7) $N = \frac{m}{M}N_A = \frac{\rho V}{M}N_A$. Поэтому

$$V = d^3 \frac{\rho V}{M} N_A.$$

Отсюда

$$d = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}} \approx 3{,}2 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Задача 3

Вычислите примерные размеры атома золота.

Решение. Объём одного моля золота равен $V_M = \frac{M}{\rho}$, где $\rho = 1,93 \cdot 10^4$ кг/м^3 — плотность золота, $M = 0,197$ кг/моль — его молярная масса. Объём одного атома золота равен

$$V_0 = \frac{V_M}{N_A} = \frac{M}{\rho N_A}.$$

Пренебрегая промежутками между атомами ввиду их плотной упаковки, найдём приближённо линейный размер атома:

$$d = \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}} = \sqrt[3]{\frac{0,197\ \text{кг/моль}}{19\,300\ \text{кг/м}^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}\ \frac{1}{\text{моль}}}} \approx$$

$$\approx 2,6 \cdot 10^{-10}\ \text{м}.$$

Упражнение 1

1. Известно, что нельзя заставить капельку оливкового масла объёмом 1 мм^3 расплыться по поверхности воды так, чтобы она заняла площадь больше 0,6 м^2. Оцените по этим данным минимальные размеры молекулы оливкового масла.
2. При образовании соединения азота с кислородом отношение масс прореагировавших веществ равно 7 : 16. Какова химическая формула этого соединения?
3. Считая диаметр атома вольфрама $d = 2 \cdot 10^{-10}$ м, оцените количество атомов, покрывающих поверхность острия иглы. Остриё считать полушаром радиусом $r = 5 \cdot 10^{-8}$ м.
4. Определите относительную молекулярную массу и молярную массу натрия Na, оксида углерода CO, оксида азота NO, медного купороса $CuSO_4$.
5. Какое количество вещества содержится в слитке серебра массой 5,4 кг?
6. Какова масса воды, взятой в количестве 100 моль?
7. Вычислите массу одного атома гелия He, молекулы оксида азота NO и молекулы метана CH_4.
8. Вода из блюдца полностью испарилась за 10 сут. Сколько в среднем вылетало молекул с поверхности воды за 1 с, если масса воды равнялась 100 г?

9. Сколько атомов содержится в стакане воды (200 г)?

10. В озеро средней глубиной 20 м и площадью поверхности 10 км^2 бросили кристаллик поваренной соли массой 0,01 г. Сколько атомов хлора оказалось бы в капле воды объёмом 10 мм^3, взятой из озера, если считать, что соль после растворения равномерно распределилась в озере?

11. Сколько атомов углерода содержится в графитовом стержне длиной $l = 10$ см и площадью сечения $S = 4$ мм^2? Плотность графита $\rho = 1{,}6 \cdot 10^3$ кг/м^3.

12. Какую площадь S имеет поверхность золотой фольги массой $m = 1$ г, если толщина её составляет $n = 10^4$ молекулярных слоёв? Плотность золота $\rho = 1{,}93 \cdot 10^4$ кг/м^3.

---

1. Напишите эссе на тему «Имеет ли смысл структурно выделять элементарные компоненты?».
2. Найдите в художественной литературе описания (не менее трёх), демонстрирующие броуновское движение.
3. Какова роль атомно-силового микроскопа в становлении и развитии нанотехнологий? Ответ представьте в виде схемы, презентации.
4. Предложите объяснение, почему теория называется молекулярно-кинетической, а не атомарно-статической.

Глава 3

ТЕМПЕРАТУРА. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

В этой главе вы узнаете немало нового о физической величине, которую каждый день упоминают в сводках погоды: о температуре, о том, как она строго научно определяется в физике.
Здесь же вы познакомитесь с эмпирическими законами поведения самого простого макроскопического тела — газа. Именно открытие и исследование газовых законов дало возможность ввести понятие абсолютной температуры.

§ 3.1. СОСТОЯНИЕ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ ТЕЛ В ТЕРМОДИНАМИКЕ

Вы знаете, как характеризуется состояние системы частиц (или тел) в классической механике. Посмотрим, как определяется состояние макроскопических тел в термодинамике.

В механике состояние системы частиц определяется их положениями (координатами) и скоростями. По начальным координатам и скоростям можно при заданных силах найти положение и скорости частиц в любой последующий момент времени.

Определить подобным образом внутреннее состояние макроскопических тел, состоящих из огромного числа частиц, нельзя. Однако поведение макроскопических тел можно охарактеризовать немногим числом физических величин, относящихся не к отдельным молекулам, слагающим тела,

а ко всему макроскопическому телу в целом. К числу таких величин относятся о б ъ ё м V, д а в л е н и е p, т е м п е р а т у р а t и др.

Так, газ данной массы всегда занимает некоторый объём, имеет определённые давление и температуру. Объём и давление представляют собой механические величины, описывающие состояние газа. Понятие температуры в механике не рассматривается, так как она характеризует внутреннее состояние тел.

Макроскопические параметры

Любое макроскопическое тело или группа макроскопических тел называется т е р м о д и н а м и ч е с к о й с и с т е м о й (от греч. systēma — целое, составленное из частей).

Величины, характеризующие состояние термодинамической системы без учёта молекулярного строения тел, называют макроскопическими (или термодинамическими) параметрами. Макроскопические параметры не исчерпываются объёмом, давлением и температурой. Например, для смеси газов нужно знать концентрации отдельных компонентов смеси. Если вещество находится в электрическом или магнитном поле, то необходимо задать характеристики этих полей в веществе.

В то же время форма сосуда, в котором находится газ, не является существенной для определения его состояния. Например, кислород в сосуде, изображённом на рисунке 3.1, *а*, будет находиться точно в таком же состоянии, в каком и кислород в сосуде другой формы (рис. 3.1, *б*), если объёмы сосу-

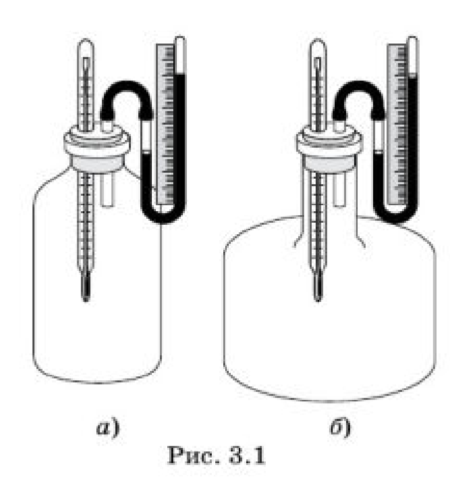


Рис. 3.1

дов, массы и температуры газов одинаковы. В частности, давления газов в обоих сосудах равны. Не зависят от формы сосуда сжимаемость газа и его другие свойства.

Давление газа в молекулярно-кинетической теории

На примере давления газа выясним, какой смысл имеют макроскопические параметры с молекулярно-кинетической точки зрения.

Пусть газ находится в закрытом сосуде. Манометр показывает давление газа p_0. Как возникает это давление? Каждая молекула газа, ударяясь о стенку, в течение малого промежутка времени действует на неё с определённой силой. В результате беспорядочных ударов о стенку сила, действующая со стороны всех молекул на поверхность стенки единичной площади, т. е. давление, будет быстро меняться со временем примерно так, как показано на рисунке 3.2. Однако действия, вызванные ударами отдельных молекул, настолько слабы, что манометром они не регистрируются. Манометр фиксирует среднюю по времени силу, действующую на каждую единицу площади поверхности его чувствительного элемента — мембраны. Несмотря на небольшие изменения давления, среднее значение давления p_0 практически оказывается вполне определённым, так как ударов о стенку очень много, а массы молекул очень малы.

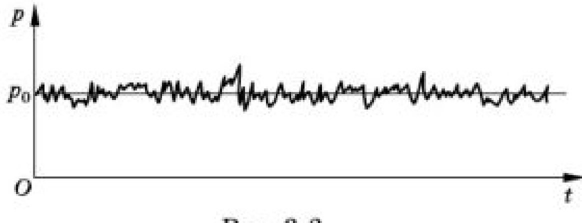


Рис. 3.2

Состояние термодинамической системы характеризуется макроскопическими параметрами — объёмом, давлением и температурой.

? **1.** Как называются величины, характеризующие состояние термодинамической системы? Перечислите их.

2. Какой смысл имеют эти величины с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

§ 3.2. ТЕМПЕРАТУРА. ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ

Термометрами пользуются все. А что они измеряют? Конечно, температуру! Однако это ещё не ответ. Что означают слова: «Я измерил температуру тела»? Что я при этом узнал? Что именно характеризует температура? Это не так просто, как может показаться на первый взгляд.

Субъективные представления о температуре

В геометрии вводят одну основную величину — длину. Остальные величины: площадь и объём — производные. В кинематике добавляют ещё одну величину — время. Скорость, ускорение являются производными. В динамике ещё одной основной величиной становится масса. В теории тепловых явлений единственная новая основная величина, которую надо ввести, — это температура.

В коже нашего тела, кроме чувствительных приёмников, реагирующих на прикосновение, давление и болевые раздражения, есть приёмники, реагирующие на раздражение ощущением тепла и холода. Руководствуясь этим, можно все тела расположить в ряд по их способности вызывать ощущения тепла и холода. Причину способности тел по-разному воздействовать на органы чувств можно связать с различной степенью *нагретости тел — температурой*. Это только качественное, субъективное определение температуры, не содержащее указаний на способ её измерения. В отличие от измерения длины, времени, массы и т. д. прошло длительное время, прежде чем на смену субъективным впечатлениям о температуре пришли точные и единые методы её измерения. Развитие методов измерения температуры стало возможным лишь тогда, когда была установлена зависимость от температуры таких величин, как длина, объём и т. д., которые можно измерять непосредственно.

Происхождение терминов «температура» и «градус»

Врачи ещё в древности заметили, что здоровье человека связано с теплотой его тела. Знаменитый античный врач Гален (ок. 130 — ок. 200) считал основным свойством лекарств их согревающее и охлаждающее действие. Наряду с этим лекарства должны регулировать противоположные качества: сухость и влажность. Все лекарства, согласно Галену, следует различать по «градусам» теплоты, холода, влажности и сухости (от лат. gradus — шаг, ступень). Каждое из этих

качеств имеет четыре основных градуса, каждый из которых в свою очередь разделяется на три части. Требуемый градус лекарств можно получить путём их смешения в разных пропорциях. Именно отсюда берёт начало термин «температура» (от лат. temperatura — смешение). Правда, ни сам Гален, ни его последователи не смогли определить количественную связь между градусом смеси и градусами компонентов. Но понятия «температура» и «градус» появились ещё до изобретения термометра.

Первые термометры

Количественные методы измерения температуры тел начали развиваться в XVII в. Первый прообраз термометра демонстрировал на своих лекциях Г. Галилей в 1592 г. Термометр Галилея (термоскоп) состоял из трубки, частично заполненной водой, и стеклянного шарика. Конец трубки был опущен в открытый сосуд с водой (рис. 3.3). При нагревании шарика давление воздуха в нём увеличивалось и уровень воды в трубке опускался. При охлаждении, наоборот, уровень поднимался вверх. Таким образом, о температуре можно было судить по уровню воды в трубке. Первое применение термоскоп нашёл в медицине.

Термоскоп Галилея имел тот недостаток, что его показания зависели от атмосферного давления. При повышении давления уровень жидкости в трубке будет повышаться без увеличения температуры. Впоследствии во Флоренции были изготовлены полностью запаянные термометры, показания которых не зависели от атмосферного давления. Вода была заменена спиртом с более высокой температурой замерзания. Чтобы показания различных термометров можно было сравнивать, необходимо ввести температурную шкалу. Для этого надо прежде всего установить постоянные точки с фиксированной температурой. После многих попыток в качестве опорных точек были выбраны температуры таяния льда и кипения воды. Впервые это предложил сделать нидерландский учёный Х. Гюйгенс (1629—1695) в 1655 г. До этого в качестве опорных точек использовались такие ненадёжные и неопределённые точки, как температура здорового человека (по Ньютону), температу-

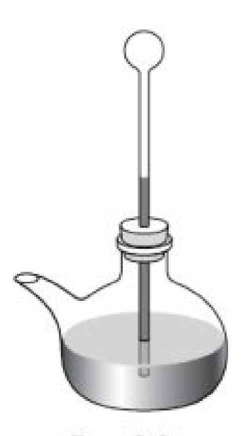


Рис. 3.3

ра воздуха при первых заморозках в окрестностях Магдебурга (по Герике) и т. д.

Самой употребительной температурной шкалой в англоязычных странах до сих пор является шкала Фаренгейта. За 0° в этой шкале принимается температура смеси снега и нашатыря, а за 100° — нормальная температура человеческого тела. Температуре замерзания воды по этой шкале соответствует 32 °F, а температуре кипения 212 °F.

Современные термометры

Для измерения температуры можно воспользоваться изменением любой макроскопической величины в зависимости от температуры: объёма, давления, электрического сопротивления и т. д.

Чаще всего на практике используют зависимость объёма жидкости (ртути или спирта) от температуры. При градуировке термометра обычно за начало отсчёта (0) принимают температуру тающего льда; второй постоянной точкой (100) считают температуру кипения воды при нормальном атмосферном давлении (шкала Цельсия). Шкалу между точками 0 и 100 делят на 100 равных частей, называемых градусами (1 °С) (рис. 3.4). Перемещение столбика жидкости на одно деление соответствует изменению температуры на 1 °С.

Обычный жидкостный термометр — очень «умный» прибор. Жидкости при нагревании незначительно увеличивают свой объём, и её расширение было бы почти незаметным, если бы жидкость расширялась только в узкой трубке. Поэтому в термометре используется простой, но хитроумный механизм усиления. Бóльшая часть жидкости находится в шарике на конце трубки, а не в самой трубке. Поэтому даже 2%-е изменение полного объёма жидкости приводит к изменению длины столбика в 10 и более раз.

Так как различные жидкости расширяются при нагревании не совсем одинаково, то установленная таким образом шкала будет до некоторой степени зависеть от свойств жидкости. Опорные точки 0 °С и 100 °С будут, конечно, совпадать у всех термометров, но, скажем, отметки 50 °С совпадать не будут.

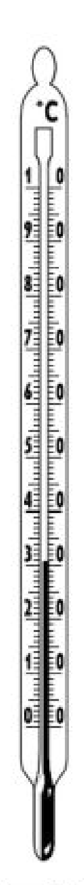


Рис. 3.4

Какое же вещество выбрать, чтобы избавиться от этой зависимости? Было замечено, что в отличие от жидкостей все разреженные газы — водород, гелий, кислород — расширяются при нагревании одинаковым образом и одинаково меняют своё давление при изменении температуры. По этой причине в физике для установления температурной шкалы используют изменение объёма определённого количества разреженного газа при постоянном давлении или изменение давления при постоянном объёме. Это так называемая газовая шкала температур. В интервале от 0 до 100 °С ртутная и газовая шкалы температур практически совпадают.

Подробнее с газовой шкалой температур мы познакомимся в дальнейшем.

Тепловое равновесие

О способах измерения температуры вы узнали. Но какое-либо физическое определение этого понятия пока не дано. Называть температурой «степень нагретости» тела явно некорректно: не ясно, что же такое «степень нагретости». Для определения температуры нужно ввести новое и очень важное понятие — тепловое равновесие.

Чтобы измерить температуру тела, следует подержать медицинский термометр под мышкой 5—8 мин. За это время ртуть в термометре нагревается и уровень её повышается. По длине столбика ртути можно судить о температуре. То же самое происходит при измерении температуры любого тела любым термометром. Термометр никогда не покажет температуру тела сразу же после того, как он соприкоснулся с ним. Необходимо некоторое время для того, чтобы температуры тела и термометра выравнялись и между ними установилось тепловое равновесие, при котором температура перестаёт изменяться.

Тепловое равновесие с течением времени устанавливается между любыми телами с различной температурой. Бросьте в стакан с водой кусочек льда и закройте стакан плотной крышкой. Лёд начнёт плавиться, а вода охлаждаться. Когда лёд растает, вода станет нагреваться; после того как она примет температуру окружающего воздуха, никаких изменений внутри стакана с водой происходить не будет.

Из этих и подобных им простых наблюдений можно сделать вывод о существовании очень важного свойства тепловых явлений: *тело при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в состояние теплового равновесия.*

Тепловым, или термодинамическим, равновесием называют такое состояние, при котором все макроскопические параметры сколь угодно долго остаются неизменными. Это означает, что не меняются объём и давление, не происходит теплообмен, отсутствуют взаимные превращения газов, жидкостей, твёрдых тел и т. д. В частности, не меняется объём столбика ртути в термометре. Это означает, что температура системы остаётся постоянной.

Но микроскопические процессы внутри тела не прекращаются и при тепловом равновесии. Меняются положения молекул, их скорости при столкновениях.

Температура

Если какое-либо тело A (например, вода в одном стакане, рис. 3.5, *а*) *находится в тепловом равновесии с телом C* (термометр), *а тело B* (вода в другом стакане) *тоже находится в равновесии с телом C, то тела A и B также находятся в состоянии теплового равновесия**. Если привести стаканы в контакт (рис. 3.5, *б*), то никаких изменений с водой внутри них не произойдёт. Именно поэтому мы можем сравнивать состояния теплового равновесия тел, не приводя их в непосредственный контакт, и ввести понятие температуры.

Не надо думать, что при любом равновесии тел A с C и B с C тела A и B обязательно будут в равновесии**. Если опустить в раствор серной кислоты медный и цинковый стержни, то через некоторое время между раствором и стержнем установится равновесие: растворение стержней и осаждение на них каких-либо веществ прекратится. Но между собой стержни не будут в равновесии. Если соединить их проводником, то по нему пойдёт электрический ток.

Мы говорим, что **тела *A* и *B* имеют одинаковую температуру, если каждое из них находится в тепловом равновесии с телом *C*** (этим телом может быть термометр). И наоборот, если тела имеют одинаковую температуру, то можно утверж-

---

* Это утверждение иногда называют «нулевым началом термодинамики». «Странный» номер появился потому, что лишь после открытия первого и второго начал (или законов) термодинамики учёным стало ясно, что данное почти очевидное утверждение надо поставить впереди.

** Вообще говоря, никогда заранее нельзя утверждать, что отношения, имеющиеся между A и C и B и C, обязательно будут и между A и B. Так, если Коля любит Лену и Алёша любит Лену, то любить друг друга Коля и Алёша не обязаны.

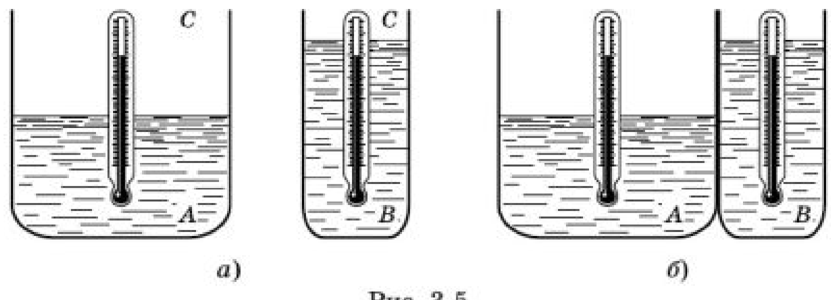


Рис. 3.5

дать, не приводя их в непосредственный контакт, что они находятся в состоянии теплового равновесия.

Термодинамическая система может находиться в различных состояниях теплового равновесия. В каждом из этих состояний температура имеет своё, строго определённое значение. Другие величины в состоянии теплового равновесия могут иметь различные (но постоянные) значения. Так, например, объёмы различных частей системы и давления внутри них при наличии твёрдых перегородок могут быть разными. Если вы внесёте с улицы мяч, наполненный сжатым воздухом, то спустя некоторое время температуры воздуха в мяче и комнате выравняются. Давление же воздуха в мяче будет по-прежнему больше давления комнатного воздуха.

Температура характеризует состояние теплового равновесия макроскопической системы: во всех частях системы, находящейся в состоянии теплового равновесия, температура имеет одно и то же значение.

При одинаковых температурах двух тел между ними не происходит теплообмена. Тела находятся в состоянии теплового равновесия. Если же температуры тел различны, то при установлении между ними теплового контакта будет происходить обмен энергией. При этом тело с большей температурой будет отдавать энергию телу с меньшей температурой. *Разность температур тел указывает направление теплообмена между ними.*

Молекулярно-кинетическое истолкование температуры

Чему соответствует с микроскопической точки зрения равенство температур макроскопических тел при тепловом равновесии между ними? Выяснение этого вопроса — одна из самых важных задач молекулярно-кинетической теории. При столкновении быстро движущихся молекул с медленно

движущимися такой же массы скорости быстрых молекул уменьшаются, а медленных — увеличиваются. За счёт бесчисленных соударений средние кинетические энергии молекул выравниваются и при тепловом равновесии имеют одно и то же значение как для молекул одинаковой массы, так и для молекул разных масс. *Температура является мерой средней кинетической энергии хаотического движения молекул в макроскопических телах.* Это утверждение будет строго обосновано нами в дальнейшем.

К отдельным молекулам понятие температуры неприменимо.

Не в первый раз вам пришлось выслушать рассказ о том, как устроен термометр и как он действует. Но появилось и нечто новое — вы познакомились с тепловым равновесием, хотя имели с ним дело множество раз. Температура позволяет отличать одно состояние теплового равновесия тела от другого. Это не очень наглядно, но очень важно для физики. Разговор о температуре ещё далеко не завершён.

? **1.** Сформулируйте бытовое (житейское) и научное определения понятия «температура».

2. Объясните, почему показания газового термометра более точные, чем жидкостного.

3. Какое состояние называют тепловым равновесием?

4. Каков молекулярно-кинетический смысл температуры?

5. Имеет ли смысл фраза: «Температура одной молекулы равна...»? Почему?

§ 3.3. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

После того как мы познакомились с тем, что такое температура и как её можно измерять, обратимся к более детальному рассмотрению тепловых явлений.

Знакомство со многими явлениями можно начать, не располагая какими-либо физическими приборами. Обыкновенный детский резиновый надувной шарик, если подойти серьёзно к наблюдению за поведением воздуха внутри него, позволит прийти к важным выводам.

Шарик, а значит, и воздух в нём имеют определённый объём V. Этот объём — одна из характеристик состояния воздуха в шарике.

Шарик, как и любое другое тело, может находиться в различных внешних условиях. Если вы поднимете его на высокую гору, то давление окружающего воздуха на его стенки уменьшится. Ведь атмосферное давление с высотой уменьшается. Это приведёт к тому, что шарик раздуется. Давление воздуха внутри него при увеличении объёма станет меньше. Наоборот, если сдавливать шарик руками (осторожно, конечно, чтобы он не лопнул), то объём его уменьшается, а давление воздуха внутри возрастает.

Связь между объёмом воздуха внутри шарика и его давлением, конечно, очевидна и понятна всем. Нужно лишь постараться заметить здесь проявление общей закономерности.

Две величины, характеризующие состояние воздуха в шарике (объём и давление), зависят друг от друга.

Не надо забывать и о температуре. Если сначала положить внутрь шарика льдинку, а потом надуть его, то произойдёт следующее. Льдинка начнёт таять, а шарик на глазах начнёт «худеть». Давление воздуха в нём и объём начнут уменьшаться. Ясно, что это происходит потому, что температура воздуха в шарике изменилась.

Из подобных простых наблюдений можно установить, что между объёмом, давлением и температурой воздуха в шарике существует определённая связь. И это справедливо не только для воздуха в шарике, но и для любого газообразного, жидкого и твёрдого тела.

Уравнение, определяющее связь температуры, объёма и давления тел, называют уравнением состояния.

Каждая система — газ, жидкость или твёрдое тело — характеризуется своим уравнением состояния. В одних случаях (например, разреженный газ) — уравнение состояния простое.

Для жидкостей из-за сложного их строения до сих пор не удалось получить общего уравнения состояния. Приходится довольствоваться весьма приближёнными уравнениями, и то для жидкостей, построенных из простых молекул. Нет универсального уравнения состояния и для твёрдых тел.

Знание уравнения состояния очень важно при исследовании тепловых процессов. Оно позволяет полностью или частично ответить сразу на три группы различных вопросов.

Уравнение состояния позволяет определить одну из величин, характеризующих состояние, например температуру, если известны две другие величины. Это и используют в термометрах.

Зная уравнение состояния, можно сказать, как будут происходить в системе различные процессы при определённых внешних условиях, например, как будет меняться давление

газа при нагревании, если его объём останется неизменным; что произойдёт с давлением газа, если увеличивать его объём при условии неизменности температуры, и т. д.

Наконец, зная уравнение состояния, можно определить, как меняется состояние системы, если она совершает работу или получает теплоту от окружающих тел.

Обо всём этом пойдёт речь в дальнейшем.

Между термодинамическими параметрами существует связь, определяемая уравнением состояния. Наша ближайшая задача — установление уравнения состояния для самой простой макроскопической системы — газа.

? **1.** Поясните смысл словосочетания «уравнение состояния».

2. Какие термодинамические параметры входят в уравнение состояния?

3. Для чего необходимо знать уравнение состояния?

4. Почему не существует универсального уравнения состояния для жидкостей и твёрдых тел?

§ 3.4. РАВНОВЕСНЫЕ (ОБРАТИМЫЕ) И НЕРАВНОВЕСНЫЕ (НЕОБРАТИМЫЕ) ПРОЦЕССЫ

Прежде чем перейти к получению уравнения состояния, познакомимся с общей классификацией термодинамических процессов.

Пусть цилиндр с поршнем заполнен газом. Если поршень неподвижен и температура окружающего воздуха неизменна, то газ в цилиндре находится в термодинамическом равновесии: давление газа во всех точках внутри цилиндра одинаково, а температура равна температуре окружающих тел.

Если сжимать газ в цилиндре под поршнем, то состояние его будет меняться: объём уменьшаться, а давление расти. Мы видим, что термодинамические параметры изменяются со временем, происходит, как говорят, термодинамический процесс. Но если сжатие происходит очень медленно, то в любой момент времени будет успевать устанавливаться новое состояние равновесия с новыми значениями давления и объёма. Подобные медленные процессы называются равновесными.

Если после медленного сжатия проводить равновесный процесс в обратном направлении, т. е. предоставить газу возможность медленно расширяться, то он пройдёт через ту же последовательность равновесных состояний, что и при

сжатии. По этой причине равновесные процессы называются обратимыми.

Именно состояние термодинамического равновесия и равновесные процессы в первую очередь являются предметом исследования в термодинамике. Здесь закономерности наиболее просты.

Процесс изменения состояния, сопровождающийся нарушением равновесия в системе, называется неравновесным. Пусть поршень сожмёт газ в цилиндре очень быстро. Тогда равновесное состояние будет нарушено, и лишь спустя некоторое время (время релаксации) газ перейдёт в новое равновесное состояние. Такой процесс сжатия будет необратимым: при быстром сжатии давление под поршнем в первый момент больше, чем в остальном цилиндре, а при быстром расширении — меньше.

Реальные процессы, конечно, не протекают бесконечно медленно, и фактически все они необратимы. Представление об обратимом процессе такая же идеализация настоящих процессов, как движение абсолютно твёрдого тела или течение идеальной жидкости в механике. Но изучение обратимых процессов тем не менее может дать нам ценные сведения о возможных изменениях в реальных системах. Кроме того, и реальные процессы могут протекать достаточно медленно, и их можно с хорошим приближением считать равновесными. Для этого надо, чтобы время изменения параметров было много больше времени релаксации.

В дальнейшем, говоря о процессах, мы будем иметь в виду именно равновесные процессы. Только для таких процессов термодинамические параметры могут иметь определённые значения для любого момента времени. При неравновесных процессах, подобных быстрому сжатию или расширению газа, параметры, например давление, не будут иметь определённого значения для всей системы.

В термодинамике преимущественно рассматриваются равновесные (медленные) процессы, при которых в каждый момент времени термодинамические параметры имеют определённые значения.

? 1. Дайте характеристику равновесных процессов.
2. Дайте характеристику неравновесных процессов.
3. Реальные процессы являются равновесными или неравновесными?
4. Почему графически изображаются только равновесные процессы?

§ 3.5. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ. ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА

Исследование термодинамических процессов начинаем с изучения более простой системы — газа. Для него экспериментально были установлены простые законы, связывающие термодинамические параметры.

Газовые законы

Изменение одного из макроскопических параметров вещества определённой массы — давления p, объёма V или температуры t — вызывает изменение остальных параметров.

Если одновременно меняются все величины, характеризующие состояние газа, то на опыте трудно установить какие-либо определённые закономерности. Проще сначала изучить процессы, в которых масса и один из трёх параметров — p, V или t — остаются неизменными. **Количественные зависимости между двумя параметрами газа одной и той же массы при неизменном значении третьего параметра называют газовыми законами.**

Закон Бойля—Мариотта

Первый газовый закон был открыт английским учёным Р. Бойлем (1627—1691) в 1660 г. Работа Бойля называлась «Новые эксперименты, касающиеся воздушной пружины». И действительно, газ ведёт себя подобно сжатой пружине, в этом можно убедиться, сжимая воздух в обычном велосипедном насосе.

Бойль изучал изменение давления газа в зависимости от объёма при постоянной температуре. **Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянной температуре называют изотермическим** (от греч. isos — равный, thérmē — тепло). Для поддержания температуры газа постоянной необходимо, чтобы он мог обмениваться теплотой с большой системой, в которой поддерживается постоянная температура, — термостатом. Термостатом может служить атмосферный воздух, если температура его заметно не меняется на протяжении опыта.

Бойль наблюдал за изменением объёма воздуха, запертого в длинной изогнутой трубке столбом ртути (рис. 3.6, *а*). Вначале уровни ртути в обоих коленах трубки были одинаковыми и давление воздуха равно атмосферному (760 мм рт. ст.). Доливая ртуть в длинное колено трубки, Бойль заметил, что

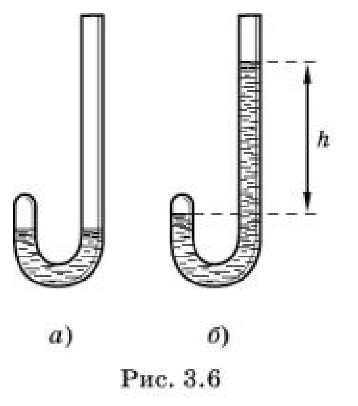


Рис. 3.6

объём воздуха уменьшился вдвое, когда разность уровней в обоих коленах оказалась равной $h = 760$ мм, и, следовательно, давление воздуха увеличилось вдвое (рис. 3.6, *б*). Это навело Бойля на мысль о том, что объём данной массы газа и его давление находятся в обратно пропорциональной зависимости. Дальнейшие наблюдения за изменением объёма при доливании различных порций ртути подтвердили это заключение.

Независимо от Бойля несколько позднее французский учёный Э. Мариотт (1620—1684) пришёл к тем же выводам. Поэтому найденный закон получил название закона Бойля—Мариотта. Согласно этому закону давление данной массы (или количества) газа при постоянной температуре обратно пропорционально объёму газа: $p \sim \frac{1}{V}$.

Если p_1 — давление газа при объёме V_1, а p_2 — его давление при объёме V_2, то

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \qquad (3.5.1)$$

Отсюда следует, что $p_1V_1 = p_2V_2$, или

$$\boxed{pV = \text{const}} \qquad (3.5.2)$$

при $t = \text{const}$.

Произведение давления газа данной массы на его объём постоянно, если температура не меняется.



Этот закон справедлив для любых газов, а также для смесей газов (например, для воздуха).

Убедиться в справедливости закона Бойля—Мариотта можно с помощью прибора, изображённого на рисунке 3.7. Герметичный гофрированный сосуд соединён с манометром, регистрирующим давление внутри сосуда. Вращением винта можно менять объём сосуда. Об объёме можно судить с помощью линейки. Меняя объём и измеряя давление, можно заметить, что уравнение (3.5.2) выполняется.

Как и другие физические законы, закон Бойля—Мариотта является приближённым. При давлениях, в несколько со-

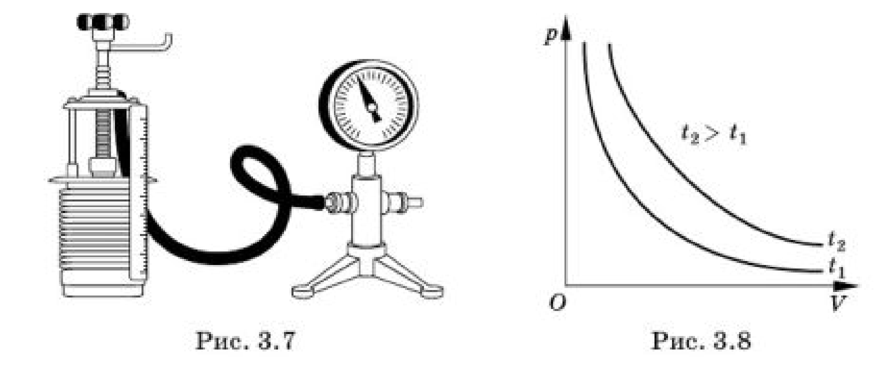


Рис. 3.7 Рис. 3.8

тен раз больших атмосферного, отклонения от этого закона становятся существенными.

На графике зависимости давления от объёма каждому состоянию газа соответствует одна точка.

Изотермы

Процесс изменения давления газа в зависимости от объёма изображается графически с помощью кривой, которая носит название изотермы (рис. 3.8). Изотерма газа выражает обратно пропорциональную зависимость между давлением и объёмом. Кривую такого рода называют гиперболой. Разным постоянным температурам соответствуют различные изотермы, так как более высокой температуре при одном и том же объёме соответствует большее давление*. Поэтому изотерма, соответствующая более высокой температуре t_2, лежит выше изотермы, соответствующей более низкой температуре t_1.

Молекулярно-кинетическое истолкование закона Бойля—Мариотта



Давление газа зависит от числа ударов молекул о стенку сосуда. Число ударов прямо пропорционально числу молекул в единице объёма (концентрации n). При уменьшении объёма газа концентрация увеличивается, так как $n = \frac{N}{V}$, где N — число молекул в сосуде. Давление пропорционально концентрации и, следовательно, обратно пропорционально

---

* Подробнее об этом будет рассказано в дальнейшем.

объёму: $p \sim n \sim \frac{1}{V}$. Так и должно быть согласно закону Бойля—Мариотта.

Закон Бойля—Мариотта устанавливает простую обратно пропорциональную зависимость между давлением и объёмом газа при постоянной температуре.

? 1. Какие законы называют газовыми?
2. Сформулируйте закон Бойля—Мариотта.
3. Изобразите графически изотермический процесс в координатах p, V; p, t; V, t.
4. Объясните закон Бойля—Мариотта на основе молекулярно-кинетической теории.

§ 3.6. ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Сообщение об открытии ещё одного газового закона было опубликовано лишь в 1802 г., спустя почти 150 лет после открытия закона Бойля—Мариотта. Закон, определяющий зависимость объёма газа от температуры при постоянном давлении (и неизменной массе), был установлен французским учёным Гей-Люссаком (1778—1850).

Закон Гей-Люссака

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называют изобарным (от греч. isos — равный и baros — тяжесть, вес).

Схематически прибор Гей-Люссака показан на рисунке 3.9. Исследуемый газ находится в стеклянном баллончи-

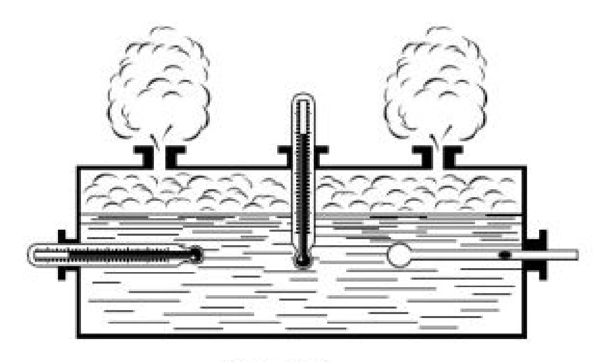


Рис. 3.9

ке, соединённом с длинной стеклянной трубкой. Газ заперт небольшой капелькой ртути в трубке. Так как трубка расположена горизонтально, то давление в баллончике всё время остаётся равным атмосферному. Температура газа с помощью специального нагревателя увеличивается от 0 до 100 °С. За изменением объёма можно следить по перемещению капельки ртути.

При изучении теплового расширения следует рассматривать не абсолютное изменение объёма, а относительное. Если при температуре $t_0 = 0$ °С объём газа равен V_0, а при температуре t он равен V, то относительное изменение объёма есть $\frac{V - V_0}{V_0}$.

На основании наблюдений Гей-Люссак установил закон: **относительное изменение объёма газа данной массы при постоянном давлении прямо пропорционально изменению температуры t:**

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha t, \qquad (3.6.1)$$

где α — температурный коэффициент объёмного расширения.

Температурный коэффициент объёмного расширения α *численно равен относительному изменению объёма газа при изменении его температуры на* 1 °С.

Измеряя объём газа при двух опорных точках, например 0 и 100 °С, можно найти коэффициент α:

$$\alpha = \frac{V_{100} - V_0}{100\ ^\circ\text{C} \cdot V_0} \qquad (3.6.2)$$

при условии, что $p_{100} = p_0$.

Опыт показывает, что при малых плотностях температурный коэффициент объёмного расширения одинаков для всех газов:

$$\alpha \approx \frac{1}{273}\ ^\circ\text{C}^{-1}. \qquad (3.6.3)$$

Это означает, что *газы изменяют свой объём примерно на* 1/273 *того объёма, который каждый из газов занимал при* 0 °С, *если температура меняется на* 1 °С.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории одинаковое значение коэффициента α для всех газов объясняется тем, что молекулы газа находятся в среднем на больших

по сравнению с их размером расстояниях друг от друга. Особенности межмолекулярных сил для различных газов в этих условиях не сказываются.

Уравнение (3.6.1) можно записать в другой форме:

$$\boxed{V = V_0(1 + \alpha t).} \tag{3.6.4}$$

Объём газа определённой массы согласно уравнению (3.6.4) при постоянном давлении меняется линейно при изменении температуры.

Экспериментальное определение зависимости объёма газа от температуры

Убедиться в справедливости закона Гей-Люссака можно с помощью уже известного нам прибора (см. рис. 3.7). Для этого, заметив показания манометра, следует измерить температуру газа в гофрированном сосуде и объём сосуда. Затем нужно нагреть газ, поместив сосуд в горячую воду, и, вращая винт, добиться того, чтобы показания манометра остались прежними. Снова измерить температуру и объём газа. После этого опять изменить температуру, добиться первоначального значения давления и измерить температуру и объём газа в третий раз.

Изобары

Используя найденные значения объёма газа при различных температурах и одном и том же давлении, можно построить график зависимости V от t. Эта зависимость изобразится прямой линией — и з о б а р о й, как и должно быть согласно формуле (3.6.4).

Различным давлениям соответствуют разные изобары (рис. 3.10). Так как с ростом давления объём газа при постоянной температуре уменьшается (закон Бойля—Мариотта), то изобара, соответствующая более высокому давлению p_2, лежит ниже изобары, соответствующей более низкому давлению p_1.

Идеальный газ

Если продолжить изобары в область низких температур, где измерения не проводились, то все прямые пересекают ось температуры в точке, соответствующей объёму, равному

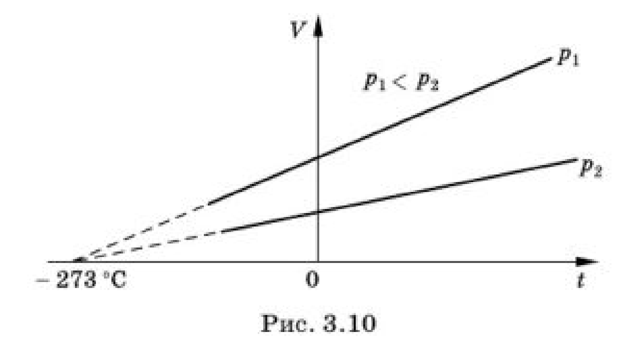


Рис. 3.10

нулю (пунктирные прямые на рис. 3.10). Но это не означает, что объём газа действительно обращается в нуль. Ведь все газы при сильном охлаждении превращаются в жидкости, а к жидкостям ни закон Гей-Люссака, ни закон Бойля—Мариотта неприменимы.

Реальные газы подчиняются основным газовым законам лишь приближённо и тем менее точно, чем больше плотность газа и ниже его температура. **Газ, который в точности подчиняется газовым законам, называют идеальным.**

Газовая шкала температур

Тот факт, что численное значение температурного коэффициента объёмного расширения в предельном случае малых плотностей одинаково для всех газов, позволяет установить температурную шкалу, не зависящую от вещества, — идеальную газовую шкалу температур.

Приняв за основу шкалу Цельсия, можно определить температуру из соотношения (3.6.1)

$$t = \frac{V - V_0}{\alpha V_0}, \qquad (3.6.5)$$

где V_0 — объём газа при 0 °С, а V — его объём при температуре t.

Таким образом, с помощью формулы (3.6.5) осуществляется определение температуры, не зависящее от вещества термометра.

Дано определение идеального газа как газа, в точности подчиняющегося законам Бойля—Мариотта и Гей-Люссака. Введена идеальная газовая шкала температур, не зависящая от вещества.

? 1. Сформулируйте закон Гей-Люссака.
2. Каков молекулярно-кинетический смысл коэффициента объёмного расширения?
3. Изобразите графически изобарный процесс в координатах p, V; p, t; V, t.
4. Какой газ называют идеальным?
5. Чем отличается реальный газ от идеального?
6. Перечислите условия, при которых реальные газы подчиняются газовым законам.

§ 3.7. АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Не всё в мире относительно. Так, существует абсолютный нуль температуры. Есть и абсолютная шкала температур. Сейчас вы узнаете об этом.

При увеличении температуры объём газа неограниченно возрастает. Не существует никакого предела для роста температуры*. Напротив, низкие температуры имеют предел.

Согласно закону Гей-Люссака (3.6.4), при понижении температуры объём стремится к нулю. Так как объём не может быть отрицательным, то температура не может быть меньше определённого значения (отрицательного по шкале Цельсия).

Абсолютный нуль температуры

Предельную температуру, при которой объём идеального газа становится равным нулю, принимают за абсолютный нуль температуры. Однако объём реальных газов при абсолютном нуле температуры обращаться в нуль не может. Имеет ли смысл тогда это предельное значение температуры?

Предельная температура, существование которой вытекает из закона Гей-Люссака, имеет смысл, так как практически можно приблизить свойства реального газа к свойствам идеального. Для этого надо брать всё более разреженный газ, так чтобы его плотность стремилась к нулю. У такого газа

---

* Наибольшие температуры на Земле — сотни миллионов градусов — получены при взрывах термоядерных бомб. Ещё более высокие температуры характерны для внутренних областей некоторых звёзд.

действительно объём с понижением температуры будет стремиться к предельному, близкому к нулю.

Найдём значение абсолютного нуля по шкале Цельсия. Приравнивая объём V в формуле (3.6.4) нулю и учитывая, что

$$\alpha \approx \frac{1}{273}\ {}^\circ\mathrm{C}^{-1},$$

получим

$$0 = V_0\left(1 + \frac{1}{273}t\right).$$

Отсюда абсолютный нуль температуры равен

$$t = -273\ {}^\circ\mathrm{C}^*.$$

Это предельная, самая низкая температура в природе, та «наибольшая или последняя степень холода», существование которой предсказал Ломоносов.

Шкала Кельвина

Английский учёный У. Кельвин ввёл абсолютную шкалу температур. Нулевая температура по шкале Кельвина соответствует абсолютному нулю, и единица температуры по этой шкале равна градусу по шкале Цельсия, поэтому абсолютная температура T связана с температурой по шкале Цельсия формулой

$$T = t + 273. \qquad (3.7.6)$$

На рисунке 3.11 для сравнения изображены абсолютная шкала и шкала Цельсия.

Единица абсолютной температуры в СИ называется **кельвином** (сокращённо К). Следовательно, один градус по шкале Цельсия равен одному градусу по шкале Кельвина: 1 °C = 1 K.

Таким образом, абсолютная температура по определению, даваемому формулой (3.7.6), является производной величиной, зависящей от

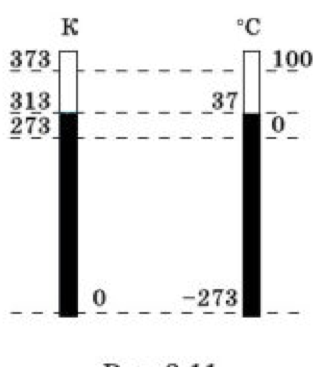


Рис. 3.11

* Более точное значение абсолютного нуля −273,15 °C.

температуры Цельсия и от экспериментально определяемого значения α. Однако она имеет фундаментальное значение.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории абсолютная температура связана со средней кинетической энергией хаотического движения атомов или молекул. При $T = 0$ К тепловое движение молекул прекращается. Подробнее об этом пойдёт речь в главе 4.

Зависимость объёма от абсолютной температуры

Применяя шкалу Кельвина, закон Гей-Люссака (3.6.4) можно записать в более простой форме. Так как

$$1 + \alpha t = 1 + \frac{1}{273}(T - 273) = \alpha T,$$

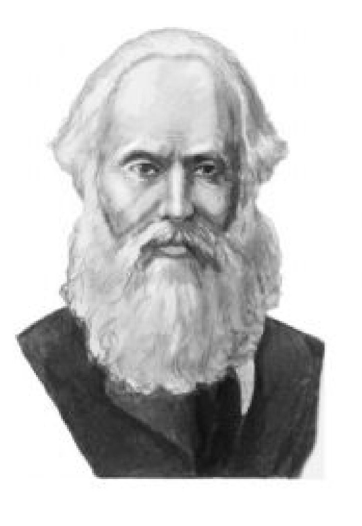
то

$$V = V_0 \alpha T. \qquad (3.7.7)$$

Объём газа данной массы при постоянном давлении прямо пропорционален абсолютной температуре.

Отсюда следует, что отношение объёмов газа одной и той же массы в различных состояниях при одном и том же давлении равно отношению абсолютных температур:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \qquad (3.7.8)$$



Кельвин Уильям (Томсон У.) (1824—1907) — выдающийся английский физик, один из основателей термодинамики и молекулярно-кинетической теории газов. Кельвин ввёл абсолютную шкалу температур и дал одну из формулировок второго начала термодинамики в форме невозможности полного превращения теплоты в работу. Он произвёл расчёт размеров молекул на основе измерения поверхностной энергии жидкости. В связи с прокладкой трансатлантического телеграфного кабеля Кельвин разработал теорию электромагнитных колебаний и вывел формулу для периода свободных колебаний в контуре. За научные заслуги У. Томсон получил титул лорда Кельвина.

Существует минимально возможная температура, при которой объём (и давление) идеального газа обращаются в нуль. Это абсолютный нуль температуры: –273 °С. Удобно отсчитывать температуру от абсолютного нуля. Так строится абсолютная шкала температур.

? 1. Назовите самую низкую температуру в природе.
2. Каким образом появилась шкала Кельвина?

§ 3.8. ЗАКОНЫ АВОГАДРО И ДАЛЬТОНА

Следует сказать ещё о двух газовых законах. Один из них касается числа молекул различных газов при одинаковых давлениях и температурах, а другой относится к смеси газов.

Закон Авогадро

В начале XIX в. было установлено правило кратных отношений для газов, вступающих в химическую реакцию. Если температуры и давления газов, соединяющихся друг с другом, равны, то их объёмы находятся в простых отношениях: 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3 и т. д. На основании этого правила Авогадро в 1811 г. высказал смелую для того времени гипотезу: *в равных объёмах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул*. При отношении 1 : 1 молекулы реагирующих газов соединяются попарно. Если отношение объёмов равно 1 : 2, то каждая молекула первого газа присоединяет к себе две молекулы второго и т. д.

В настоящее время гипотеза Авогадро строго доказана и носит название закона Авогадро.

Согласно закону Авогадро **различные газы, взятые в количестве 1 моль, имеют одинаковые объёмы при одинаковых давлениях p и температурах t**, так как число молекул в них одно и то же. При нормальных условиях, т. е. при температуре 0 °С и атмосферном давлении 101 325 Па, этот объём, как показывают измерения, равен

$$V_{M0} = 0{,}0224 \text{ м}^3/\text{моль} = 2{,}24 \text{ л/моль}. \qquad (3.8.1)$$

Объём V_{M0} называют молярным при нормальных условиях.

Почему же в равных объёмах газов при одинаковых давлениях и температурах всегда обнаруживается одно и то же число молекул независимо от того, какой газ взят? Объяснить это можно только с помощью молекулярно-кинетической теории (см. § 4.5).

Закон Дальтона

Чаще имеют дело не с чистым газом — кислородом, водородом и т. д., а со смесью газов. Атмосферный воздух, в частности, представляет собой смесь азота, кислорода и многих других газов. Каждый из газов смеси вносит свой «вклад» в суммарное давление на стенки сосуда. Давление, которое имел бы каждый из газов, составляющих смесь, если удалить из сосуда остальные газы, называют парциальным (т. е. частным) давлением.

Простейшее предположение, которое можно сделать, состоит в том, что давление смеси газов p равно сумме парциальных давлений всех газов $p_1, p_2, p_3 \ldots$:

$$\boxed{p = p_1 + p_2 + p_3 \ldots} \qquad (3.8.2)$$

Английский химик Д. Дальтон установил, что для достаточно разреженных газов именно так и есть в действительности. Соотношение (3.8.2) называют законом Дальтона.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории закон Дальтона выполняется потому, что взаимодействие между молекулами идеального газа пренебрежимо мало. Поэтому каждый газ оказывает на стенку сосуда такое давление, как если бы остальных газов не было.

Моль любого газа при нормальных условиях занимает объём 22,4 л. Это значение объёма установлено экспериментально. В смеси газов каждый из них оказывает давление на стенки сосуда независимо от присутствия других газов.

? 1. Сформулируйте закон Авогадро.
2. Какие условия называют нормальными? Каким образом они получены?
3. Сформулируйте закон Дальтона.

§ 3.9. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Состояние данной массы газа характеризуется тремя макроскопическими параметрами: давлением p, объёмом V и температурой T. Сейчас мы найдём связь между ними.

Уравнение состояния

В § 3.5 и 3.6 вы ознакомились с поведением идеального газа в специально созданных условиях. Два параметра из трёх (p, V или V, T) изменялись при постоянном значении третьего (T или p). Обычно же в природе и технике у газа меняются сразу все три параметра. Например, когда нагретый у поверхности Земли воздух поднимается вверх, то он расширяется, давление его уменьшается и температура понижается.

Используя газовые законы (3.5.2) и (3.7.8), можно получить уравнение, связывающее все три параметра p, V и T, характеризующие состояние газа данной массы. Это уравнение называют уравнением состояния идеального газа.

Изменение состояния газа

Для опыта используем уже известный нам прибор (см. рис. 3.7). Пусть в начальном состоянии *1* газ в сосуде (рис. 3.12, *а*) имеет давление p_1, объём V_1 и температуру T_1, равную температуре окружающего воздуха. Затем газ переходит в конечное состояние *2*, при котором давление, объём и температура будут иметь значения p_2, V_2, T_2. Какова связь между всеми этими величинами?

Переведём газ из состояния *1* в состояние *2* с помощью двух процессов, подчиняющихся законам Гей-Люссака и Бойля—Мариотта: изобарного и изотермического. Для этого поместим сосуд в большую банку с водой, нагретой до

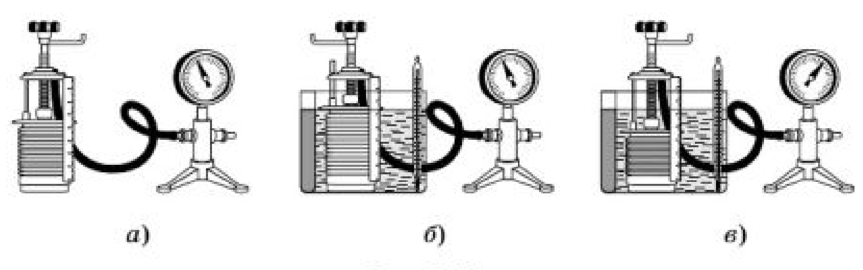


Рис. 3.12

температуры T_2 (рис. 3.12, *б*). Вода в банке будет служить термостатом. Одновременно начнём увеличивать объём газа так, чтобы давление p_1 оставалось постоянным (изобарный процесс). Газ с течением времени перейдёт в промежуточное состояние *1'* с объёмом V' и температурой T_2. Графически этот переход изобразится прямой *1—1'* на рисунке 3.13.

Затем изотермически при температуре T_2 переведём газ в конечное состояние с давлением p_2 и объёмом V_2, медленно уменьшая объём сосуда (рис. 3.12, *в*). Графически это изобразится участком гиперболы *1'—2* (см. рис. 3.13).

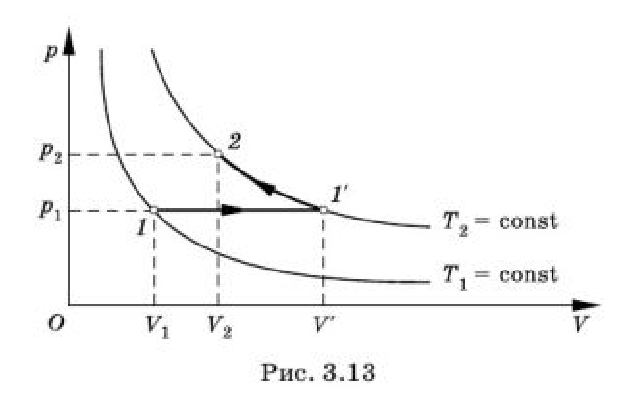


Рис. 3.13

Вывод уравнения состояния идеального газа

Согласно закону Гей-Люссака (3.7.8)

$$\frac{V_1}{V'} = \frac{T_1}{T_2}. \qquad (3.9.1)$$

Применяя закон Бойля—Мариотта (3.5.2) для изотермического процесса, получим

$$p_1V' = p_2V_2. \qquad (3.9.2)$$

Выразим из уравнения (3.9.1) V':

$$V' = V_1\frac{T_2}{T_1} \qquad (3.9.3)$$

и подставим полученное значение в уравнение (3.9.2), тогда

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} \text{ при } m = \text{const}. \qquad (3.9.4)$$

В пределах точности, обеспечиваемой экспериментальной установкой, данный результат согласуется с опытом.

Так как начальное и конечное состояния газа выбраны произвольно, то **произведение давления газа данной массы на его объём, делённое на абсолютную температуру, есть величина постоянная, не зависящая от состояния, в котором находится газ:**

$$\frac{pV}{T} = \text{const}. \qquad (3.9.5)$$

Уравнение (3.9.5) носит название уравнения Клапейрона* и представляет собой одну из форм записи уравнения состояния идеального газа.

Если величина постоянна, то естественно выяснить, чему равна эта постоянная.

Универсальная газовая постоянная

Возьмём вначале газ в количестве 1 моль, его объём обозначим через V_M. При температуре 0 °С и атмосферном давлении 101 325 Па объём моля любого газа один и тот же: $V_{M0} = 0{,}0224$ м³/моль. Следовательно, для моля любого газа

$$\frac{pV_M}{T} = \frac{p_0 V_{M0}}{T_0} = \frac{101\,325 \cdot 0{,}0224}{273} \, \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{моль} \cdot \text{К}} = 8{,}31 \, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Таким образом, *для одного моля газа произведение давления на объём, отнесённое к абсолютной температуре, является постоянной величиной для всех газов.* Эту постоянную называют **универсальной газовой постоянной** и обозначают буквой R:

$$R = 8{,}31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}. \qquad (3.9.6)$$

Уравнение Менделеева—Клапейрона

Для 1 моль идеального газа, как вытекает из выражений (3.9.5) и (3.9.6),

$$pV_M = RT. \qquad (3.9.7)$$

Пусть теперь количество газа равно не 1 моль, а произвольному числу молей $\nu = \frac{m}{M}$, где m — масса газа, а M — его

---

* *Б. П. Клапейрон* (1799—1864) — французский физик, в течение 10 лет работал в России.

молярная масса. Объём V этого количества вещества при тех же значениях давления и температуры равен

$$V = \nu V_M = \frac{m}{M} V_M. \qquad (3.9.8)$$

Умножая обе части уравнения (3.9.7) на ν и учитывая уравнение (3.9.8), получим наиболее общую формулу уравнения состояния для произвольной массы идеального газа

$$\boxed{pV = \frac{m}{M} RT.} \qquad (3.9.9)$$

В такой форме уравнение состояния было впервые записано великим русским учёным Д. И. Менделеевым. Поэтому уравнение (3.9.9) называют у р а в н е н и е м М е н д е л е е в а—К л а п е й р о н а.

Единственная величина в уравнении состояния, зависящая от рода газа, это его молярная масса.

Уравнение состояния (3.9.9) — *первое из замечательных обобщений в физике, с помощью которых свойства разных веществ выражаются через одни и те же основные величины. Именно к этому стремится физика — к нахождению общих законов, не зависящих от тех или иных веществ. Газы, существенно простые по своей природе, дали первый пример такого обобщения.*



Менделеев Дмитрий Иванович (1834—1907) — великий русский учёный, создатель Периодической системы химических элементов — одного из самых глубоких обобщений в науке. Д. И. Менделееву принадлежат важнейшие работы по теории газов, взаимным превращениям газов и жидкостей (открытие критической температуры, выше которой газ нельзя превратить в жидкость). Передовой общественный деятель, Д. И. Менделеев много сделал для развития производительных сил России, использования полезных ископаемых и развития химического производства.

? 1. Выведите уравнение состояния идеального газа.

2. Почему уравнение состояния идеального газа «носит» фамилии двух учёных — Менделеева и Клапейрона?

3. Объясните физический смысл универсальной газовой постоянной.

4. Почему газовая постоянная называется универсальной?

§ 3.10. ЗАКОН ШАРЛЯ. ГАЗОВЫЙ ТЕРМОМЕТР

С помощью уравнения состояния можно найти зависимость давления газа от температуры при постоянном объёме. Эту зависимость экспериментально установил французский физик Ж. Шарль (1746—1823) в 1787 г. Располагая уравнением состояния идеального газа, прибегать к опыту уже нет необходимости.*

Закон Шарля

Согласно уравнению (3.9.9)

$$p = \frac{mR}{MV}T. \qquad (3.10.1)$$

Давление газа данной массы при постоянном объёме прямо пропорционально абсолютной температуре. В этом и состоит закон Шарля.

Из закона Шарля следует, что *отношение давлений данной массы газа при постоянном объёме равно отношению его абсолютных температур*:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \qquad (3.10.2)$$

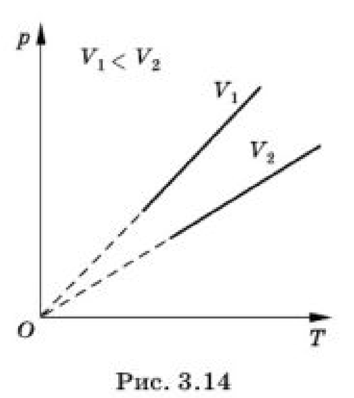


Рис. 3.14

Процесс изменения давления газа, вызванный изменением температуры при постоянном объёме, называют изохорным (от греч. isos — равный и chōra — занимаемое место). Зависимость давления газа от температуры графически изображается прямой линией — изохорой. Разным объёмам соответствуют различные изохоры (рис. 3.14). Так как

---

* Ж. Шарль в 1787 г., т. е. раньше, чем Гей-Люссак, установил и зависимость объёма от температуры при постоянном давлении, но он своевременно не опубликовал своих работ.

с ростом объёма газа при постоянной температуре давление его падает (закон Бойля—Мариотта), то изохора, соответствующая объёму V_2, лежит ниже изохоры, соответствующей объёму $V_1 < V_2$.

Все прямые заканчиваются в начале координат. Значит, давление идеального газа при абсолютном нуле равно нулю, так же как и объём.

Предлагаем читателю самостоятельно убедиться в том, что закон Шарля можно записать в форме

$$p = p_0 \gamma T, \tag{3.10.3}$$

где p_0 — давление газа при температуре $T = 273$ К, а коэффициент γ, называемый *температурным коэффициентом давления газа*, равен температурному коэффициенту объёмного расширения:

$$\gamma \approx \frac{1}{273}\ \text{К}^{-1} = \alpha.$$

Коэффициент γ представляет собой относительное изменение давления при изменении температуры газа на 1 К.

Газовый термометр постоянного объёма

В § 3.6 говорилось об идеальной газовой шкале температур. Для определения температуры по этой шкале используют газовые термометры. Наиболее простым газовым термометром является термометр постоянного объёма. Измерение температуры с помощью этого термометра основано на законе Шарля (3.10.2).

Газовый термометр представляет собой сосуд, заполненный тем или иным газом: азотом, аргоном или гелием. Сосуд соединён гибкой трубкой с ртутным манометром, которым измеряют давление газа и поддерживают его постоянный объём (рис. 3.15, *а*, *б*). Сначала измеряют давление при некоторой фиксированной температуре T_0 (см. рис. 3.15, *а*)*. Затем измеряют давление при температуре T (см. рис. 3.15, *б*). Зная давление p_0 при температуре T_0 и давление p при температуре T, температуру T определяют по формуле

$$T = T_0 \frac{p}{p_0}. \tag{3.10.4}$$

---

* В качестве этой температуры обычно выбирается температура тройной точки воды, т. е. температура состояния, в котором лёд, вода и водяной пар находятся в тепловом равновесии.

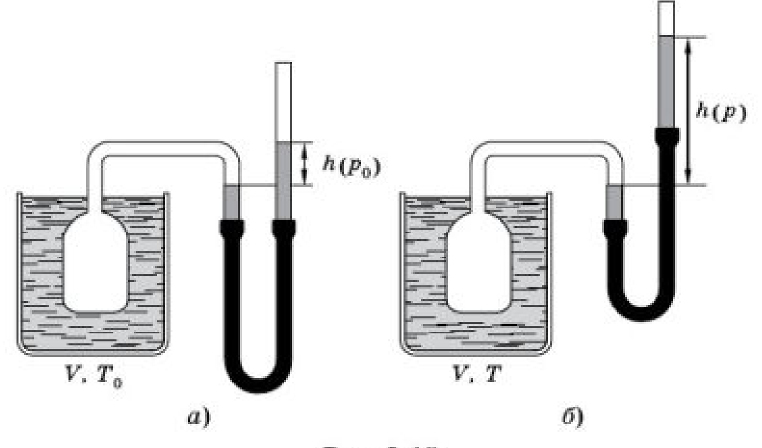


Рис. 3.15

Газовый термометр для точных измерений — очень сложное устройство. Для измерения температуры при физических исследованиях он применяется редко. Основное его назначение — использование для градуировки более простых, вторичных термометров. Эта градуировка производится в бюро стандартов, в метрологических институтах и в отдельных физических лабораториях. Для градуировки обычных, широко применяемых термометров используются вторичные термометры.

На законе Шарля основано устройство газового термометра для определения температуры по идеальной газовой шкале.

? **1.** Сформулируйте закон Шарля.

2. Изобразите изохорный процесс в координатах p, V; p, T; V, T.

3. Опишите принцип работы газового термометра.

§ 3.11. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВ В ТЕХНИКЕ

Газы обладают рядом свойств, которые делают их незаменимыми в очень большом числе технических устройств. Все особенности поведения газов, позволяющие использовать их на практике, можно установить с помощью уравнения состояния (3.9.9).

Газ — сжатое упругое тело

Как следует из уравнения состояния, давление, оказываемое газом на стенки сосуда, равно

$$p = \frac{m}{M}\frac{RT}{V}. \qquad (3.11.1)$$

Это давление исчезает лишь при $m \to 0$ (газа почти нет) или $V \to \infty$ (газ неограниченно расширился), а также при $T \to 0$ (молекулы газа не движутся).

Сила давления газа на стенки $F = pS$ представляет собой частный вид силы упругости. Газ подобен пружине, которая всегда сжата. Важно, что газ малой массы способен создавать сравнительно большое давление.

Управление давлением газа

Давление газа можно менять, изменяя его объём или температуру. Кроме того, силу давления газа легко регулировать и не меняя его объём или температуру. Газ — это сжатая «пружина», «жёсткость» которой можно быстро изменить, используя прямо пропорциональную зависимость давления газа от его массы (см. формулу (3.11.1)). Увеличивая массу газа в любом замкнутом пространстве, мы можем увеличить давление. Так и поступают, например, накачивая автомобильную шину или футбольный мяч воздухом. Выпуская часть газа из сосуда, уменьшают его давление.

Большая сжимаемость газов

Газы, особенно при давлениях, близких к атмосферному, по сравнению с жидкостями и твёрдыми телами легко сжимаются. Это означает, что небольшое изменение давления заметно меняет их объём. И наоборот, значительное изменение объёма не приводит к большому изменению давления.

Благодаря большой сжимаемости газа сила его давления мало меняется при расширении или сжатии. Поэтому газ, толкая поршень, совершает значительную работу на большом отрезке пути.

Хорошая сжимаемость газов позволяет запасать их в больших количествах в баллонах, удобных для хранения. Сжатый природный газ транспортируется по трубам на расстояния в тысячи километров.

Зависимость объёма газа от температуры

Объём газов значительно увеличивается при увеличении температуры. При нагревании на 1 °С объём газа при посто-

янном давлении увеличивается в сотни раз больше, чем объём жидких и твёрдых тел.

Все перечисленные свойства газов используются в технике.

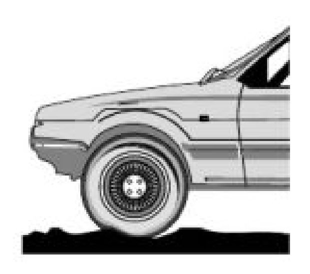


Рис. 3.16

Газ — амортизатор

Свойство газа не сохранять свою форму, малая его плотность и возможность регулировки давления делают газ одним из самых совершенных амортизаторов.

Вот как работает автомобильная или велосипедная шина. Когда колесо наезжает на бугорок, шина с находящимся в ней воздухом деформируется (рис. 3.16) и толчок, получаемый осью колеса, значительно смягчается. Если бы шина была жёсткой, то ось подпрыгнула бы вверх на высоту бугорка или ещё выше.

Газ — рабочее тело двигателей

Большая сжимаемость газов и ярко выраженная зависимость их давления и объёма от температуры делают газ «удобным» рабочим телом в двигателях, работающих на сжатом газе, и в тепловых двигателях.

В двигателях, работающих на сжатом газе, в частности на сжатом воздухе, газ (воздух) при расширении вследствие хорошей сжимаемости совершает работу почти при постоянном давлении. Сжатый воздух, оказывая давление на поршень, открывает двери в автобусах, поездах метро и электричках. Сжатым воздухом приводят в движение поршни воздушных тормозов железнодорожных вагонов и грузовиков. Пневматический молоток и другие пневматические инструменты приводятся в движение сжатым воздухом.

Даже на космических кораблях имеются небольшие реактивные двигатели, работающие на сжатом газе — гелии. Они ориентируют корабль нужным образом.

В двигателях внутреннего сгорания на автомобилях, тракторах, самолётах и в реактивных двигателях в качестве рабочего тела, приводящего поршень, турбину или ракету в движение, используют газы высокой температуры.

При сгорании горючей смеси в цилиндре (например, паров бензина и воздуха) температура резко увеличивается,

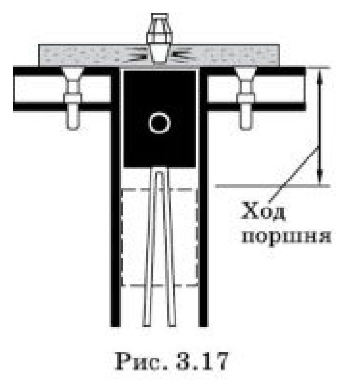


Рис. 3.17

давление на поршень растёт и газ, расширяясь, совершает работу на всей длине рабочего хода поршня (рис. 3.17).

Практически только газ можно эффективно использовать в качестве рабочего тела в двигателях. Нагревание жидкого или твёрдого тела до такой же температуры, как и газа, вызвало бы лишь незначительное перемещение поршня.

Любое огнестрельное оружие в сущности является тепловой машиной. Рабочее тело здесь тоже газ — продукты сгорания взрывчатых веществ. Сила давления газа выталкивает пулю из канала ствола или снаряд из дула орудия. И существенно, что эта сила совершает работу на всей длине канала. Поэтому скорости пули и снаряда оказываются огромными: сотни метров в секунду.

Разреженные газы

Полезные свойства газов, с успехом используемые в технике, в некоторых случаях играют отрицательную роль. От газа трудно избавиться, т. е. получить газ в сосуде при очень низком давлении — в состоянии вакуума, когда молекулы газа сталкиваются не друг с другом, а только со стенками сосуда.

Высокий вакуум нужен во многих случаях, и главным образом в электронно-лучевых трубках и других вакуумных приборах. Иногда приходится создавать вакуум в очень больших объёмах, например в огромных ускорителях элементарных частиц или для имитации космического пространства. Один из самых больших имитаторов в Хьюстоне (США) имеет диаметр 22 м и высоту 15-этажного дома (40 м). Когда астронавты высаживались на Луне, дублирующий экипаж проделывал те же операции в имитаторе. Это позволяло направлять действия астронавтов в случае непредвиденных аварий.

Высокий вакуум нужен и для многих других целей, в частности для выплавки свободных от оксидов металлов, создания термоизоляции, например в термосах.

Обычные поршневые насосы из-за просачивания газов между поршнем и стенками цилиндра становятся неэффективными. Получить с их помощью давление ниже десятых до-

лей миллиметра ртутного столба не удаётся. Приходится для откачки газов применять различные сложные устройства.

В настоящее время при температуре 30 К достигнуты давления до 10^{-12} Па. При охлаждении до температуры жидкого гелия (≈ 5 К) давление должно было бы составлять 10^{-31} Па. Такое давление уже невозможно измерить. Концентрация газа при таком давлении $n \approx 3 \cdot 10^{-11}$ м$^{-3}$. Это означает, что, например, через куб со стороной 1 м молекула пролетит 1 раз в 3 года. Даже давление в межгалактическом космическом пространстве намного больше: 10^{-27} Па. А внутри нашей галактики давление составляет 10^{-15} Па.

§ 3.12. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задачи на применение газовых законов очень разнообразны. Для их решения нельзя указать какой-либо один определённый приём. Полезными могут оказаться следующие советы.

1. Если согласно условию задачи один из трёх параметров (p, V или T) постоянный, то при T = const надо применять закон Бойля—Мариотта (3.5.2), при p = const — закон Гей-Люссака (3.7.7), а при V = const — закон Шарля (3.10.2) или (3.10.3).

2. Если изменяются все три параметра, то следует воспользоваться уравнением состояния в форме (3.9.9) или (3.9.5).

Уравнение состояния (3.9.9) применяется в тех случаях, когда известна масса газа и часть макроскопических параметров в определённом состоянии газа и надо найти неизвестные величины.

3. Для определения давления смеси газов, не вступающих в химические реакции, используют закон Дальтона (3.8.2).

4. Во многих задачах требуется построение графиков, изображающих разного рода процессы. Для этого нужно знать зависимость параметров друг от друга, которая в общем случае даётся уравнением состояния, а в частных — газовыми законами.

5. При решении большинства задач надо чётко представлять себе, каково начальное состояние системы и какой процесс переводит его в конечное состояние.

Задача 1

Как измерить медицинским термометром температуру тела человека, если температура окружающего воздуха +42 °С?

Решение. Можно предварительно охладить термометр в холодильнике. Если холодильника нет, то нужно подержать термометр 5—8 мин под мышкой, извлечь его и сразу же стряхнуть. Термометр покажет температуру тела, так как ртуть в термометре сожмётся при контакте с телом до объёма, соответствующего температуре тела.

Задача 2

Газ в цилиндрическом сосуде разделён на две равные части подвижным поршнем, имеющим массу m и площадь сечения S. При горизонтальном положении цилиндра давление газа в каждой половине сосуда равно p. Определите давление p_1 газа над поршнем при вертикальном положении цилиндра. Температуру газа считать постоянной.

Решение. При горизонтальном положении цилиндра объём каждой его части обозначим через V (эти объёмы равны). При вертикальном положении цилиндра объём верхней части станет равным $V + \Delta V$, а нижней $V - \Delta V$. Давление в нижней части цилиндра станет равным $p_1 + \frac{mg}{S}$. Согласно закону Бойля—Мариотта

$$p_1(V + \Delta V) = \left(p_1 + \frac{mg}{S}\right)(V - \Delta V) = pV.$$

Исключив из этих равенств $\frac{\Delta V}{V}$, получим квадратное уравнение для p_1:

$$p_1^2 - \left(p - \frac{mg}{S}\right)p_1 - \frac{mgp}{2S} = 0.$$

Отсюда

$$p_1 = \frac{1}{2}\left(p - \frac{mg}{S} + \sqrt{p^2 + \left(\frac{mg}{S}\right)^2}\right).$$

Второй корень квадратного уравнения отрицателен и потому лишён физического смысла.

Задача 3

Поршневой насос при каждом качании захватывает воздух объёмом V_0. При откачке этим насосом воздуха из сосуда объёмом V насос совершил n качаний. Затем другой насос с тем же рабочим объёмом V_0 начал нагнетать воздух из ат-

мосферы в тот же сосуд, совершив также n качаний. Какое давление установится в сосуде? Температуру воздуха во время работы насоса считать постоянной.

Решение. Согласно закону Бойля—Мариотта при откачке воздуха из сосуда после первого качания давление в сосуде станет равным $p_1 = \frac{p_0 V}{V + V_0}$, где p_0 — атмосферное давление. После второго качания будет выполняться равенство $p_1 V = p_2(V + V_0)$ и, следовательно, $p_2 = p_0\left(\frac{V}{V + V_0}\right)^2$ и т. д. После n качаний в сосуде установится давление $p_n = p_0\left(\frac{V}{V + V_0}\right)^n$.

При нагнетании воздуха в сосуд после n качаний давление станет равным

$$p = p_n + \frac{p_0 n V_0}{V} = p_0\left\{\left(\frac{V}{V + V_0}\right)^n + \frac{nV_0}{V}\right\}.$$

При любом n $p > p_0$, так как во время нагнетания воздуха при каждом качании насос захватывает воздух, имеющий атмосферное давление p_0, а при откачке при каждом качании удаляется воздух при давлении, меньшем p_0.

Задача 4

В запаянной с обоих концов цилиндрической трубке находится воздух при нормальных условиях. Трубка разделена подвижным поршнем на две части, объёмы которых V_1 и V_2 относятся как 1 : 2. До какой температуры t_1 следует нагреть воздух в меньшей части трубки и до какой t_2 охладить в большей, чтобы поршень делил трубку на две равные части, если нагревание и охлаждение в обеих частях трубки производятся при условии $\frac{V}{T} = \text{const}$?

Решение. Условие $\frac{V}{T} = \text{const}$ означает, что процессы нагревания и охлаждения происходят изобарно. При отношении начальных объёмов $\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{2}$ эти объёмы составляют $V_1 = \frac{1}{3}V_0$ и $V_2 = \frac{2}{3}V_0$, где V_0 — объём всей трубки. Конечные объёмы обеих частей одинаковы и равны $V_3 = \frac{1}{2}V_0$.

Согласно закону Гей-Люссака для воздуха в меньшей части трубки выполняется соотношение

$$\frac{V_1}{V_3} = \frac{T_0}{T_1},$$

а для воздуха в большей части —

$$\frac{V_2}{V_3} \text{ À } \frac{T_0}{T_2}$$

где $T_0 = 273$ К — температура, соответствующая начальным условиям. Отсюда

$$T_1 = \frac{T_0 V_3}{V_1} = \frac{3}{2} T_0 \approx 410 \text{ К, или } t_1 \approx +137 \text{ °C};$$

$$T_2 = \frac{T_0 V_3}{V_2} = \frac{3}{4} T_0 \approx 205 \text{ К, или } t_2 \approx -68 \text{ °C}.$$

Задача 5

В цилиндре под поршнем находится воздух при давлении $p_1 = 2 \cdot 10^5$ Па и температуре $t_1 = 27$ °C. Определите массу m груза, который нужно положить на поршень после нагревания воздуха до температуры $t_2 = 50$ °C, чтобы объём воздуха в цилиндре стал равен первоначальному. Площадь поршня $S = 30$ см^2.

Решение. Так как в процессе нагревания объём воздуха в цилиндре не изменяется, то согласно закону Шарля имеем

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \qquad (3.12.1)$$

где

$$p_2 = p_1 + \frac{mg}{S}.$$

Подставляя в (3.12.1) выражение для p_2, получим

$$\frac{p_1}{p_1 + \frac{mg}{S}} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Отсюда

$$m = \frac{p_1 S}{g}\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) \approx 4{,}7 \text{ кг}.$$

Задача 6

Найдите среднюю (эффективную) молярную массу сухого атмосферного воздуха, предполагая известный процентный состав воздуха по массе: азот — $n_1 = 75{,}52\%$, кислород — $n_2 = 23{,}15\%$, аргон — $n_3 = 1{,}28\%$ и углекислый газ — $n_4 = 0{,}05\%$.

Решение. Для каждого газа можно записать уравнение состояния:

$$p_1V = \frac{m_1}{M_1}RT, p_2V = \frac{m_2}{M_2}RT, p_3V = \frac{m_3}{M_3}RT, p_4V = \frac{m_4}{M_4}RT.$$

Здесь M_1, M_2, M_3 и M_4 — молярные массы соответственно азота, кислорода, аргона и углекислого газа.

Складывая правые и левые части этих уравнений, получим

$$(p_1 + p_2 + p_3 + p_4)V = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \frac{m_3}{M_3} + \frac{m_4}{M_4}\right)RT. \quad (3.12.2)$$

Для смеси газов выполняется соотношение

$$pV = \frac{m}{M}RT, \quad (3.12.3)$$

где $m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$ — масса воздуха с объёмом V, а M — искомая эффективная молярная масса.

Согласно закону Дальтона,

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + p_4.$$

Сравнивая уравнения состояния (3.12.2) и (3.12.3), получим

$$M = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \frac{m_3}{M_3} + \frac{m_4}{M_4}}.$$

Разделив числитель и знаменатель на m и умножив на 100%, получим выражение для M через процентный состав воздуха по массе

$$M = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + n_4}{\frac{n_1}{M_1} + \frac{n_2}{M_2} + \frac{n_3}{M_3} + \frac{n_4}{M_4}} = 28{,}966 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \approx$$

$$\approx 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

Задача 7

Закрытый с обоих концов цилиндр наполнен газом при давлении $p = 100$ кПа и температуре $t = 30$ °C и разделён подвижным теплонепроницаемым поршнем на две равные части длиной L по 50 см. На какую величину ΔT нужно повысить температуру газа в одной половине цилиндра, чтобы поршень сместился на расстояние $l = 20$ см, если во второй половине цилиндра температура не изменяется? Определите давление газа после смещения поршня.

Решение. Для газа в части цилиндра с постоянной температурой применим закон Бойля—Мариотта:

$$pLS = p_1(L - l)S, \qquad (3.12.4)$$

где S — площадь основания цилиндра. Для нагреваемой части цилиндра запишем уравнение Клапейрона:

$$\frac{pLS}{T} = \frac{p_1(L + l)S}{T + \Delta T}. \qquad (3.12.5)$$

В уравнениях (3.12.4) и (3.12.5) p_1 — давление газа после смещения поршня, одинаковое в обеих частях цилиндра вследствие равновесия поршня, а $T + \Delta T$ в уравнении (3.12.5) — температура газа в нагретой части цилиндра.

Разделив почленно уравнение (3.12.4) на уравнение (3.12.5), получим

$$T = (T + \Delta T)\frac{L - l}{L + l}.$$

Отсюда

$$\Delta T = \frac{2Tl}{L - l} = 404 \text{ К}.$$

Из уравнения (3.12.4) находим p_1:

$$p_1 = \frac{Lp}{L - l} = 167 \text{ кПа}.$$

Задача 8

Сосуд объёмом $V = 100$ л разделён пополам полупроницаемой перегородкой. В начальный момент времени в одной половине сосуда находился водород, масса которого $m_1 = 2$ г, а во второй — 1 моль азота. Определите давления, установившиеся по обе стороны перегородки, если она может пропускать только водород. Температура в обеих половинах одинакова и постоянна: $t = 127$ °C.

Решение. Так как водород свободно проходит через перегородку, то он распространяется по всему сосуду. Запишем уравнение Менделеева—Клапейрона для водорода после установления состояния равновесия:

$$p_1V = \frac{m_1}{M_1}RT,$$

где $M_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль — молярная масса водорода.

В той части сосуда, в которой вначале был только водород, он и в дальнейшем останется в чистом виде, так что давление в этой части сосуда станет равным

$$p_1 = \frac{m_1RT}{M_1V} \approx 33 \text{ кПа}.$$

Для азота уравнение Менделеева—Клапейрона имеет вид

$$p_2 = \frac{2}{V}RT,$$

где p_2 — давление азота.

Так как в этой половине находятся водород и азот, то полное давление p, согласно закону Дальтона, складывается из парциальных давлений p_1 и p_2, т. е.

$$p = p_1 + p_2 = \left(\frac{m_1}{M_1} + 2\right)\frac{RT}{V} \approx 0{,}1 \text{ МПа}.$$

Задача 9

Гелий массой 20 г, заключённый в теплоизолированном цилиндре под поршнем, медленно переводится из состояния *1* с объёмом V_1 = 32 л и давлением p_1 = 4,1 атм в состояние *2* с объёмом V_2 = 9 л и давлением p_2 = 15,5 атм. Какой наибольшей температуры достигнет газ при этом процессе, если на графике зависимости давления газа от объёма процесс изображается прямой линией (рис. 3.18)?

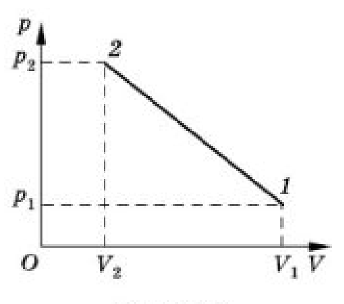


Рис. 3.18

Решение. Как следует из рисунка 3.18, давление и объём газа связаны линейной зависимостью: $p = aV + b$, где a и b — постоянные

коэффициенты. Из условий задачи получаем систему уравнений

$$p_1 = aV_1 + b,\ p_2 = aV_2 + b.$$

Решив эту систему относительно a и b, найдём

$$a = \frac{p_1 - p_2}{V_1 - V_2} \approx -0{,}5 \text{ атм/л},$$

$$b = \frac{p_2V_1 - p_1V_2}{V_1 - V_2} \approx 20 \text{ атм}.$$

Подставив в уравнение Менделеева—Клапейрона вместо p выражение $aV + b$, получим

$$aV^2 + bV = \frac{m}{M}RT = \text{const} \cdot T. \qquad (3.12.6)$$

График зависимости T от V представляет собой параболу (рис. 3.19). Кривая достигает максимума при $V_{max} = -\frac{b}{2a} = 20$ л, когда корни квадратного уравнения (3.12.6) совпадают.

При этом

$$p_{max} = aV_{max} + b = \frac{b}{2} \approx 10 \text{ атм}.$$

Следовательно,

$$T_{max} = \frac{p_{max}V_{max}}{mR}M \approx 490 \text{ К}.$$

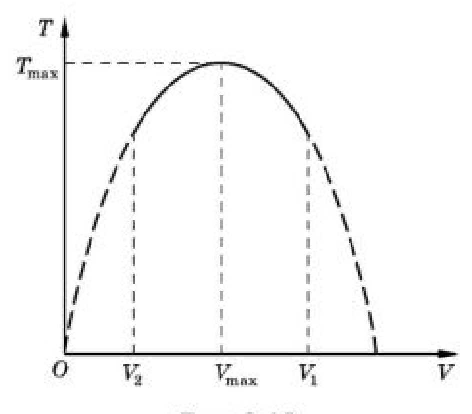


Рис. 3.19

Задача 10

На рисунке 3.20 изображён график изменения состояния идеального газа в координатах p, V. Начертите графики этого процесса в координатах V, T и p, T.

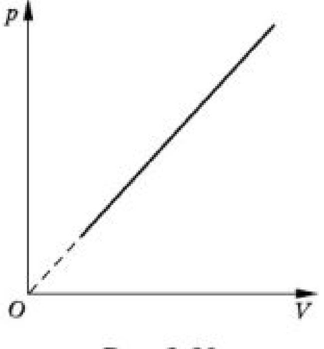


Рис. 3.20

Решение. Из рисунка 3.20 следует, что давление газа p и его объём V находятся в прямой пропорциональной зависимости

$$p = kV, \qquad (3.12.7)$$

где k — постоянный коэффициент.

Подставив значение давления (3.12.7) в уравнение Менделеева—Клапейрона, получим

$$kV^2 = \frac{m}{M}RT,$$

или

$$V^2 = \frac{mR}{Mk}T. \qquad (3.12.8)$$

Уравнение (3.12.8) — это уравнение параболы, ось симметрии которой совпадает с осью T. Следовательно, в координатах V, T искомый график имеет вид, показанный на рисунке 3.21, *а*. Аналогично получим график этого процесса в координатах p, T (рис. 3.21, *б*).

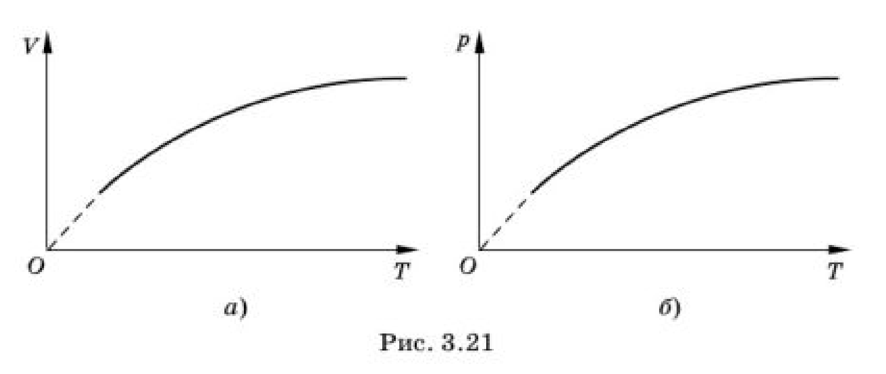


Рис. 3.21

Упражнение 2

1. Вы надули щёки. При этом и давление, и объём воздуха во рту увеличиваются. Как это согласуется с законом Бойля—Мариотта?

2. Чтобы измерить температуру человеческого тела, приходится держать термометр под мышкой в течение 5—8 мин. В то же время стряхнуть его можно практически сразу после измерения температуры. Почему?

3. Узкая вертикальная трубка длиной L, закрытая с одного конца, содержит воздух, отделённый от наружного воздуха столбиком ртути длиной h. Плотность ртути равна ρ. Трубка расположена открытым концом вверх. Какова была длина l столбика воздуха в трубке, если при перевёртывании трубки открытым концом вниз из трубки вылилась половина ртути? Атмосферное давление равно p_0.

4. В ртутный барометр попал пузырёк воздуха, вследствие чего барометр показывает давление меньше истинного. При давлении p_1 = 768 мм рт. ст. уровень ртути расположен на высоте h_1 = 748 мм, причём длина пустой части трубки l = 80 мм. Каково атмосферное давление p_2, если ртуть стоит на высоте h_2 = 734 мм? Плотность ртути $\rho = 1{,}36 \cdot 10^4$ кг/м^3.

5. Площадь сечения цилиндра автомобильного насоса S = 10 см^2. Определите длину l цилиндра, если известно, что для накачки шины объёмом V = 0,02 м^3 от давления $p_0 = 1 \cdot 10^5$ Па до давления $p = 3 \cdot 10^5$ Па требуется совершить n = 100 качаний. Утечкой и нагреванием воздуха пренебречь.

6. В цилиндре под поршнем находится воздух. Поршень имеет форму, показанную на рисунке 3.22. Масса поршня m = 6 кг, площадь сечения цилиндра S = 20 см^2. Атмосферное давление $p_0 = 10^5$ Па. Найдите массу m_1 груза, который надо положить на поршень, чтобы объём V_1 воздуха в цилиндре уменьшился в 2 раза. Трение не учитывать. Температура постоянна.

Рис. 3.22

7. Газ нагрет от температуры t_1 = 27 °C до температуры t_2 = 39 °C. На сколько процентов увеличился его объём, если давление осталось неизменным?

8. Вертикальный цилиндр, закрытый подвижным поршнем, содержит газ массой m = 0,012 кг. При температуре

$t_1 = 177$ °C объём газа равен $V_1 = 4$ л. При какой температуре t_2 плотность этого газа будет равна $\rho_2 = 5{,}3$ кг/м^3?

9. Открытую стеклянную колбу, имеющую форму шара радиусом $r = 2$ см с горлышком длиной $l = 10$ см и диаметром $d = 1$ см, нагрели до температуры t_1, а затем погрузили целиком в воду горлышком вниз. При охлаждении колбы вода вошла в горлышко. Когда температура колбы стала равной $t_2 = 13$ °C, её начали приподнимать из воды, не переворачивая, так чтобы шарообразная часть оказалась над водой, а горлышко — частично погружённым в воду. При этом, когда уровень воды в горлышке и в сосуде совпал, под водой осталась половина горлышка. Какова была температура t_1, до которой нагрели колбу?

10. Манометр на баллоне с газом в помещении с температурой $t_1 = 17$ °C показывает давление $p = 240$ кПа. На улице показание манометра уменьшилось на $\Delta p = 40$ кПа. Найдите температуру наружного воздуха, если атмосферное давление $p_0 = 100$ кПа.

11. Два сосуда одинаковой вместимости содержат воздух, один при температуре T_1 и давлении p_1, другой при температуре T_2 и давлении p_2. Сосуды соединили тонкой трубкой и после выравнивания давлений и температур воздух нагрели до температуры T. Какое давление установится после нагревания?

12. Шар-зонд заполнен газом при температуре $t_1 = 27$ °C до давления $p_1 = 105$ кПа. После подъёма шара на высоту, где давление $p_0 = 80$ кПа, объём шара увеличился на $n = 5\%$ и давление в нём стало отличаться от внешнего на $\Delta p = 5$ кПа. Определите температуру воздуха на этой высоте, предполагая, что газ в шаре приобрёл температуру окружающего воздуха.

13. Из баллона со сжатым углекислым газом из-за неисправности вентиля вытекает газ. Вместимость баллона $V = 10$ л. При температуре $T_1 = 263$ К манометр показывал давление $p_1 = 9{,}3$ атм, а через некоторое время при температуре $T_2 = 295$ К манометр показывал давление $p_2 = 9{,}4$ атм. Чему равна масса m газа, вытекшего из баллона за это время?

14. Газ последовательно переводится из состояния *1* с температурой T_1 в состояние *2* с температурой T_2, а затем в состояние *3* с температурой T_3 и возвращается в состоя-

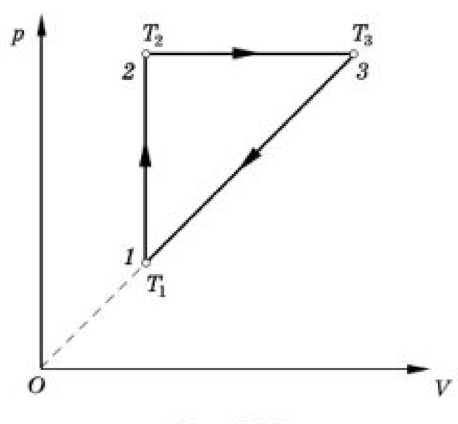


Рис. 3.23

ние *1*. Определите температуру T_3, если процессы изменения состояния происходили так, как это показано на графике (рис. 3.23), а температуры T_1 и T_2 известны.

15. В баллоне вместимостью $V = 10$ л содержится водород при температуре $t = 20$ °С под давлением $p = 10^7$ Па. Какая масса водорода была выпущена из баллона, если при полном сгорании оставшегося газа образовалось $m = 50$ г воды?

16. В баллоне вместимостью $V = 10$ л находился гелий под давлением $p_1 = 10$ атм при температуре $t_1 = 27$ °С. После того как из баллона был выпущен газ массой $m = 10$ г, температура в баллоне была понижена до $t_2 = 17$ °С. Определите давление гелия, оставшегося в баллоне.

17. Молекулярный водород некоторой массы занимает объём $V_1 = 1$ м^3 при температуре $T_1 = 250$ К и давлении $p_1 = 2 \cdot 10^5$ Па. Какое давление водород будет создавать при температуре $T_2 = 5000$ К и объёме $V_2 = 10$ м^3, если при столь высокой температуре молекулы водорода полностью диссоциируют на атомы?

18. Два сосуда объёмом $V_1 = 200$ см^3 и $V_2 = 100$ см^3, наполненные кислородом при температуре $t = 27$ °С под давлением $p_0 = 760$ мм рт. ст., соединены трубкой, внутри которой находится теплоизолирующая пористая перегородка, обеспечивающая одинаковость давлений в сосудах. Затем первый сосуд нагрели до температуры $t_1 = 100$ °С, а второй охладили до температуры $t_2 = 0$ °С. Определите установившееся в системе давление.

19. Изобразите на графиках в координатах p, V; p, T и V, T изотермический процесс для одного моля газа при $T = T_1$ и $T = 2T_1$.

20. Изобразите на графиках в координатах p, V; p, T и V, T изобарный процесс: 1) для $p = p_1$ и $p = 2p_1$, если ν = 1 моль; 2) для $p = p_1$, если ν = 3 моль.

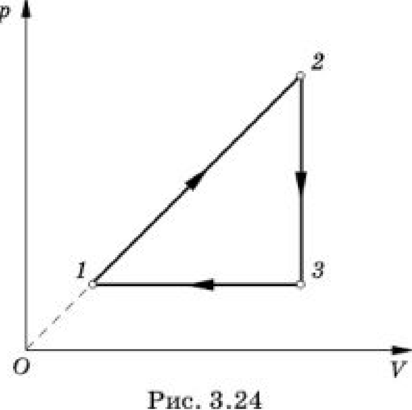


Рис. 3.24

21. На рисунке 3.24 показан график изменения состояния идеального газа в координатах p, V. Представьте этот процесс на графиках в координатах V, T и p, T.

---

1. Какими макроскопическими параметрами описывается состояние человека?
2. Предположите вид взаимосвязи между этими параметрами в состоянии теплового равновесия. Каким образом соотносятся понятия «тепловое равновесие» и «эмоциональное равновесие»?
3. Изобразите цветовую диаграмму своего настроения за неделю, подпишите к каждому состоянию значение своей температуры, сделайте вывод.
4. Подготовьте краткое сообщение о происхождении терминов «температура» и «градус».
5. Подготовьте краткое сообщение о создании первых термометров.
6. Подготовьте краткое сообщение о современных термометрах, используемых в быту, медицине и на производстве (в технике).
7. Сделайте презентацию «Температурные шкалы: виды, особенности».
8. Подготовьте дискуссию «Д. И. Менделеев: химик или физик?».
9. Подготовьте краткое сообщение о применении газов в технике.
10. Сделайте презентацию «Применение газов в технике».

Глава 4

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Качественное объяснение большого числа явлений на основе молекулярно-кинетической теории достаточно просто и наглядно. Однако количественная теория даже такой простой системы, как идеальный газ, весьма сложна. Поэтому ограничимся знакомством только с теорией идеального газа. Кроме того, познакомимся с новым типом законов — статистическими законами.

§ 4.1. СИСТЕМЫ С БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ ЧАСТИЦ И ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ. СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

К системам с очень большим числом частиц законы механики Ньютона непосредственно применять невозможно. Место механики Ньютона занимает статистическая механика. Она позволяет вычислять средние значения физических величин, которые регистрируются макроскопическими приборами.

Термодинамические параметры с микроскопической точки зрения

Как свойства, так и состояние макроскопического тела определяются характером взаимодействия и движения слагающих его частиц. Следовательно, значение любого термодинамического параметра должно быть каким-то образом связано с движением молекул или атомов тела.

Такая связь на качественном уровне была рассмотрена в § 3.1 на примере давления газа на стенку сосуда. Было показано, что манометр регистрирует среднюю по времени силу, действующую на единицу площади поверхности его мембраны со стороны молекул. Из-за того что ударов о стенку очень много, это среднее значение оказывается вполне определённой величиной, несмотря на небольшие колебания давления.

Давление газа в каждый момент зависит от координат и импульсов молекул газа. Оно изменяется со временем именно потому, что меняются эти величины. Давление как макроскопический параметр есть не что иное, как среднее по времени от некоторой функции координат и импульсов всех молекул газа.

Этот вывод носит общий характер: значения термодинамических параметров в состоянии термодинамического равновесия являются средними по времени от соответствующих этим параметрам функций координат и импульсов частиц, слагающих систему.

Системы из большого числа частиц и законы механики

Термодинамические параметры, которые и являются макроскопическими характеристиками состояния вещества, подлежащими определению, могут быть найдены путём усреднения по времени функций координат и импульсов всех частиц системы. Но для этого нужно знать зависимость координат и импульсов всех микрочастиц от времени, т. е. решить задачу о движении огромного числа частиц.

Движение молекул в классической (не квантовой) физике подчиняется законам механики Ньютона. Состояние системы из любого числа частиц полностью определяется заданием их координат и скоростей (или импульсов). Законы эти просты, однако они мало что могут дать, если их непосредственно применить к движению частиц, слагающих макротела, поскольку частиц очень много. Механика Ньютона хорошо приспособлена для описания движения небольшого числа тел. Но и в этом случае сравнительно простые силы вызывают движения, которые могут оказаться весьма сложными. Например, простые силы всемирного тяготения обусловливают очень сложные траектории планет, если учитывать не только притяжение их к Солнцу, но и взаимное влияние друг на друга.

Если же число движущихся частиц достигает миллионов, миллиардов и т. д., то чисто механический подход вообще теряет смысл. Можно тешить себя иллюзией, что в принципе, если было бы известно состояние системы (т. е. координаты и импульсы всех частиц системы) в начальный момент времени и заданы силы взаимодействия частиц друг с другом, можно было бы рассчитать движение частиц замкнутой системы с любой степенью точности. Однако сама постановка задачи (определение начальных положений и импульсов частиц) не менее трудна, чем её решение. В этой ситуации не помогут никакие вычислительные машины.

Известно, например, что газ, взятый в объёме 1 см^3, при нормальных условиях содержит около 10^{19} молекул; для задания их начального состояния необходимо $6 \cdot 10^{19}$ чисел. Если вводить в ЭВМ по тысяче чисел в 1 с, то потребуется около $2 \cdot 10^9$ лет. Кроме того, ведь ни одна система не может считаться полностью изолированной от внешних воздействий. Они всегда есть. По подсчётам французского учёного Э. Бореля, изменение координат и скоростей молекул на величину порядка 10^{-100} делает невозможным предсказание движения молекул газа уже спустя 10^{-6} с. А ведь такое изменение координат и скоростей молекул газа может произойти, если на Сириусе 1 г вещества переместится на 1 см.

Статистическая механика

Трудности создания количественной теории процессов, происходящих внутри макроскопических тел, на основе представления о движении молекул кажутся на первый взгляд непреодолимыми. Однако задача исследования систем из огромного числа частиц всё же поддаётся решению. Поведение таких систем обнаруживает определённые закономерности. Но это уже закономерности нового типа, закономерности статистической механики, или статистической физики.

Оказывается, что для описания свойств макроскопических тел и процессов с их участием, которые наблюдаются на опыте, не нужно знать микроскопическое состояние системы (значения всех координат и импульсов частиц). Важно знать не поведение отдельных молекул, а *средний результат*, к которому приводит их совокупное движение. Этот средний результат и можно предвидеть с помощью законов статистической механики.

Очевидно, каждому микроскопическому состоянию отвечает определённое макроскопическое состояние (определён-

ные значения макроскопических параметров). Однако одному и тому же макроскопическому состоянию может отвечать огромное число микроскопических состояний. Например, ни давление, ни температура газа в состоянии термодинамического равновесия не меняются, но молекулы, из которых состоит газ, непрерывно движутся, микроскопические состояния системы непрерывно сменяют друг друга.

Средние по времени и статистические средние

Перед статистической механикой стоит задача определения средних значений любых функций координат и скоростей молекул без вычисления зависимости этих величин от времени. Посмотрим, как в принципе можно решить эту задачу на примере вычисления среднего значения квадрата скорости v^2 молекулы газа, от которого зависит её средняя кинетическая энергия $\tilde{E}_k = \frac{m\tilde{v}^2}{2}$ (знак «~» сверху означает усреднение по времени).

Допустим, что в сосуде с газом, температура которого поддерживается постоянной, имеется достаточно большое число N молекул. Выделим мысленно одну из них. Если произвести ряд последовательных измерений скорости данной молекулы в моменты времени t_1, t_2, t_3 и т. д. через малые одинаковые промежутки времени (рис. 4.1, *а*), проделав достаточно большое число N_1 измерений (в принципе это возможно), то среднее по времени значение квадрата скорости можно записать так:

$$\tilde{v}^2 = \frac{v^2(t_1) + v^2(t_2) + \ldots + v^2(t_{N_1})}{N_1}. \qquad (4.1.1)$$

Это простое арифметическое среднее.

Далее очевидно, что все N молекул газа находятся в одинаковых макроскопических условиях. Ни одна из них не выделяется в смысле характера своего поведения среди других. Поэтому средний квадрат скорости газовой молекулы можно определить и по-другому. Пусть о д н о в р е м е н н о измерены скорости v_1, v_2, ..., v_N всех молекул (рис. 4.1, *б*). Тогда средний квадрат скорости молекулы равен среднему арифметическому квадратов скоростей всех молекул газа в данный момент:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \ldots + v_N^2}{N}. \qquad (4.1.2)$$

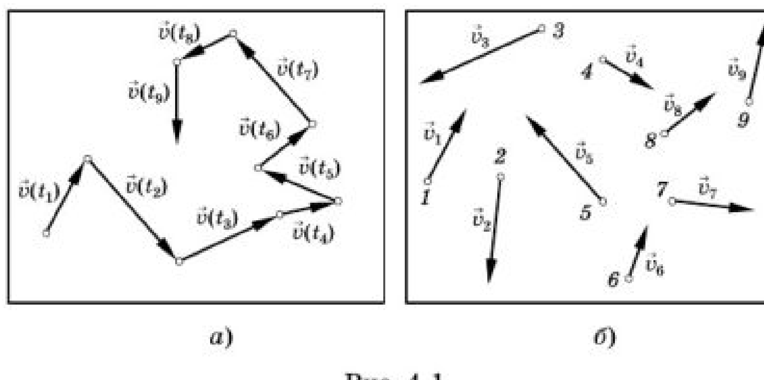


Рис. 4.1

Определённое так среднее значение квадрата скорости $\overline{v^2}$ называется статистическим средним (или средним по совокупности) в отличие от среднего по времени значения квадрата скорости $\tilde{v}^2$.

Основное допущение, которое принимается в статистической механике, состоит в том, что *среднее по времени совпадает со статистическим средним.* В рассмотренном простом случае такое допущение представляется достаточно естественным. Оно предполагает полный хаос в движении молекул, когда все они в общем ведут себя одинаково. Теория строится так, чтобы она позволяла определять статистические средние, так как задача непосредственного вычисления временных средних заведомо невыполнима.

Два этапа становления статистической механики (молекулярно-кинетической теории)

В первых исследованиях принималось в качестве приближения, что все молекулы имеют одинаковые модули скоростей, равные их средним значениям. С помощью этих средних скоростей вычислялось среднее число соударений молекул в секунду, средняя длина свободного пробега и т. д.

Решительный шаг вперёд был сделан в 1859 г. английским физиком Дж. Максвеллом (1831—1879), который впервые ввёл в физику понятие вероятности, выработанное ранее при анализе азартных игр.

До Максвелла казалось, что единственной альтернативой предположения о равенстве скоростей их средним значениям является строгое решение уравнений Ньютона для всех частиц системы.

Введение вероятности позволило, наряду со средними значениями физических величин, рассматривать вероятности того, что эти величины принимают те или иные значения. В дальнейшем понятие вероятности стало основным для любого статистического закона.

Мы в основном ограничимся знакомством с элементарными вычислениями средних значений. Лишь во второй части главы на простом примере познакомимся с вероятностными законами статистической механики.

Теперь вы знаете, как определяются средние значения, в частности средний квадрат скорости молекул. Это непростой вопрос. Вы привыкли к тому, что скорость имеет каждая частица. Средняя же скорость молекул зависит от движения всех частиц.

? **1.** Каков смысл термодинамических параметров с микроскопической точки зрения?

2. Каким образом в статистической физике рассчитываются средние величины (на примере средней скорости)?

3. Как развивалась молекулярно-кинетическая теория с введением Дж. Максвеллом в физику понятия вероятности?

§ 4.2. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ В МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

В предыдущей главе мы познакомились с уравнением состояния идеального газа. Это уравнение было получено из экспериментальных газовых законов. Молекулярно-кинетическая теория привлекалась лишь для качественного объяснения наблюдаемых на опыте закономерностей. Но физика — наука количественная, и сейчас можно говорить о молекулярно-кинетической теории (или статистической механике) как о разделе современной физики только потому, что построена количественная теория молекулярных процессов.

Идеальный газ

Реальный газ — достаточно сложная система. Мы рассмотрим простейшую физическую модель реального газа — идеальный газ.

Под моделью в физике понимают не увеличенную или уменьшенную копию реального объекта. *Физическая модель — это упрощённая схематическая копия исследуемой*

реальной системы. Модель должна отражать наиболее существенные, наиболее характерные свойства системы.

В модели газа принимаются во внимание лишь те основные свойства молекул, учёт которых необходим для объяснения закономерностей поведения реального газа в определённых интервалах давления и температуры.

В молекулярно-кинетической теории идеальным газом называют газ, состоящий из молекул, взаимодействие между которыми пренебрежимо мало. Иными словами, предполагается, что средняя кинетическая энергия молекул идеального газа во много раз больше потенциальной энергии их взаимодействия. Именно данная модель реального газа приводит к уравнению состояния (3.9.9). Поэтому термодинамическое определение идеального газа как газа, подчиняющегося уравнению состояния Менделеева—Клапейрона, находится в полном соответствии с приведённым выше молекулярно-кинетическим определением идеального газа.

Реальные газы ведут себя подобно идеальному газу при достаточно больших разрежениях, т. е. когда *среднее расстояние между молекулами во много раз больше их размеров.* В этом случае силами притяжения между молекулами можно пренебречь. Силы их отталкивания проявляются в течение ничтожно малых промежутков времени при столкновениях молекул друг с другом.

Значение столкновений между молекулами

Столкновения между молекулами существенны, так как именно благодаря этим столкновениям газ переходит в состояние теплового равновесия. В этом состоянии молекулы в сосуде движутся в полном беспорядке, так что во всех частях сосуда наблюдается полный хаос. Столкновения между молекулами в состоянии равновесия газа уже ничего принципиально не меняют. Они не влияют ни на давление, ни на температуру газа. Поэтому в состоянии теплового равновесия можно вообще пренебречь размерами молекул и считать, что молекулы идеального газа — это материальные точки.

Конечно, с помощью такой простой модели нельзя объяснить все без исключения процессы в разреженных газах (например, оптические явления). Но мы поставим и будем решать частную задачу: вычислить с помощью молекулярно-кинетической теории давление газа. Для этой задачи простейшая модель газа оказывается вполне удовлетворительной. Она приводит к результатам, которые подтверждаются опытом.

Идеальный газ — модель реального газа. Молекулы этого газа — крошечные шарики, не взаимодействующие друг с другом; точнее, кинетическая энергия молекул много больше потенциальной энергии их взаимодействия.

? **1.** Что является физической моделью реального газа?

2. Опишите свойства идеального газа.

3. Почему для идеального газа существует несколько определений?

§ 4.3. СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ

Прежде чем приступить к вычислению давления газа с помощью молекулярно-кинетической теории, рассмотрим детальнее простые закономерности, относящиеся к средним значениям скоростей теплового движения молекул.

Средние значения

Предположим, что молекулы газа движутся беспорядочно. Скорость любой молекулы может оказаться как очень большой, так и очень маленькой. Направление движения молекул хаотически меняется при их столкновениях друг с другом. Об этом было рассказано в главе 2. Наблюдение броуновского движения служит доказательством участия молекул в хаотическом движении.

Однако, хотя движение отдельных молекул хаотично, поведение всех молекул в целом обнаруживает простые закономерности. Во-первых, если в газе произвольно выделить какое-либо направление, то среднее число молекул, движущихся в этом направлении, должно равняться среднему числу молекул, движущихся в противоположном направлении. Ведь хаос в движении молекул означает, что ни одно из направлений движения не является преимущественным. Все они равноправны.

Точно так же среднее число людей, идущих по улице города в одну и в другую сторону, в среднем за достаточно большой промежуток времени (или для достаточно большой группы людей) одинаково. Конечно, если исключить особые случаи вроде уличного шествия.

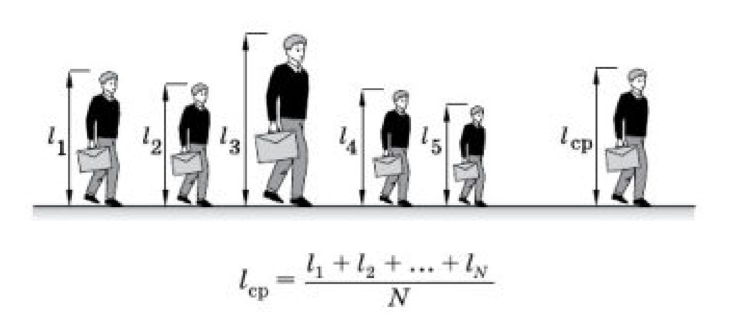
Во-вторых, простые закономерности справедливы для средней арифметической скорости молекул. Пусть имеется

N молекул. Проекции скоростей этих молекул на ось X могут принимать всевозможные значения: υ_{1x}, υ_{2x}, υ_{3x}, ..., υ_{Nx}, причём каждая проекция может быть как положительной, так и отрицательной. Средняя арифметическая проекции скорости $\overline{\upsilon}_x$ на данное направление X равна сумме проекций скоростей всех молекул, делённой на их число:

$$\overline{\upsilon}_x = \frac{\upsilon_{1x} + \upsilon_{2x} + ... + \upsilon_{Nx}}{N}. \qquad (4.3.1)$$

Из-за хаоса в движении молекул положительные значения проекций скоростей встречаются столь же часто, как и отрицательные. Поэтому среднее значение проекции скорости на данное направление X равно нулю: $\overline{\upsilon}_x = 0$. Если бы это было не так, то газ двигался бы как единое целое.

Среднее же значение модуля проекции скорости $|\overline{\upsilon_x}|$ является вполне определённой величиной, отличной от нуля. Поясним это таким примером. Рост учеников в одном классе неодинаков, но среднее значение роста — определённая величина. Чтобы её найти, надо сложить рост всех учеников и разделить эту сумму на их количество (рис. 4.2).



$$l_{ср} = \frac{l_1 + l_2 + ... + l_N}{N}$$

Рис. 4.2

Среднее значение квадрата скорости

Нас будет интересовать средний квадрат проекции скорости. Он находится так же, как квадрат модуля скорости (см. выражение (4.1.2)):

$$\overline{\upsilon_x^2} = \frac{\upsilon_{1x}^2 + \upsilon_{2x}^2 + ... + \upsilon_{ix}^2 + ... + \upsilon_{Nx}^2}{N}. \qquad (4.3.2)$$

Скорости молекул принимают непрерывный ряд значений. Определить точные значения скоростей и вычислить среднее значение (статистическое среднее) с помощью формулы (4.3.2) практически невозможно. Определим $\overline{v_x^2}$ несколько иначе, более реалистично. Обозначим через n_1 число молекул в объёме 1 см^3, имеющих проекции скоростей, близкие к v_{1x}; через n_2 — число молекул в том же объёме, но со скоростями, близкими к v_{kx}, и т. д.* Число молекул со скоростями, близкими к максимальной v_{kx}, обозначим через n_k (скорость v_{kx} может быть сколь угодно велика). При этом должно выполняться условие $n_1 + n_2 + \ldots$ $\ldots + n_i + \ldots + n_k = n$, где n — концентрация молекул. Тогда для среднего значения квадрата проекции скорости вместо формулы (4.3.2) можно написать следующую эквивалентную формулу:

$$\overline{v_x^2} = \frac{n_1 v_{1x}^2 + n_2 v_{2x}^2 + \ldots + n_i v_{ix}^2 + \ldots + n_k v_{kx}^2}{n}. \qquad (4.3.3)$$

Так как направление X ничем не отличается от направлений Y и Z (опять-таки из-за хаоса в движении молекул), справедливы равенства

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}. \qquad (4.3.4)$$

Для каждой молекулы квадрат скорости равен

$$v_i^2 = v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2.$$

Значение среднего квадрата скорости, определяемое так же, как средний квадрат проекции скорости (см. формулы (4.3.2) и (4.3.3)), равно сумме средних квадратов её проекций:

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}. \qquad (4.3.5)$$

Из выражений (4.3.4) и (4.3.5) следует, что

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}, \qquad (4.3.6)$$

---

* О том, как эти числа могут быть определены, будет рассказано в § 4.6.

т. е. средний квадрат проекции скорости равен $\frac{1}{3}$ среднего квадрата самой скорости. Множитель $\frac{1}{3}$ появляется вследствие трёхмерности пространства и, значит, существования трёх проекций у любого вектора.

Скорости молекул беспорядочно меняются, но среднее значение проекций скорости на любое направление и средний квадрат скорости — вполне определённые величины.

? Каким образом определяются среднее значение проекций скорости и средний квадрат скорости молекул? Для чего необходимы данные величины?

§ 4.4. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Вычислим с помощью молекулярно-кинетической теории давление газа. На основе проделанных расчётов можно будет сделать очень важный вывод о связи температуры газа со средней кинетической энергией молекул.

Пусть газ находится в прямоугольном сосуде с твёрдыми стенками. Газ и сосуд имеют одинаковые температуры, т. е. находятся в состоянии теплового равновесия. Будем считать столкновения молекул со стенками абсолютно упругими. При этом условии кинетическая энергия молекул в результате столкновения не меняется.

Требование того, чтобы столкновения были абсолютно упругими, не является строго обязательным. В точности оно и не реализуется. Молекулы могут отражаться от стенки под разными углами и со скоростями, не равными по модулю скоростям до соударения. Но в среднем кинетическая энергия отражённых стенкой молекул будет равна кинетической энергии падающих молекул, если только существует тепловое равновесие. Результаты расчёта не зависят от детальной картины столкновений молекул со стенкой. Поэтому вполне допустимо считать столкновения молекул подобными столкновениям упругих шаров с абсолютно гладкой твёрдой стенкой.

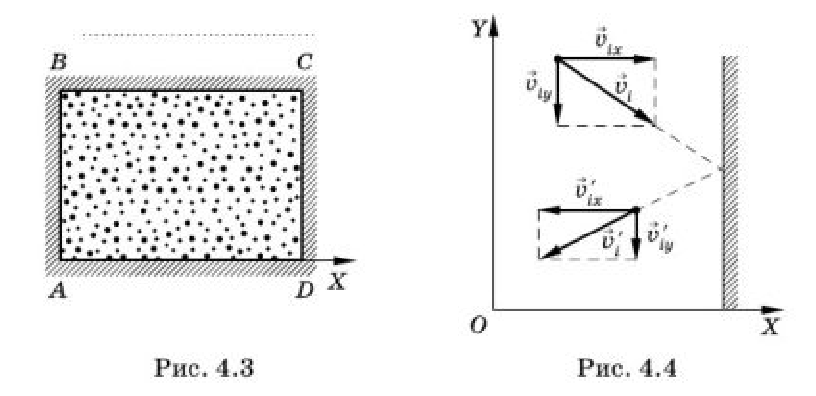


Рис. 4.3 Рис. 4.4

Вычислим давление газа на стенку сосуда CD, имеющую площадь S и расположенную перпендикулярно оси X (рис. 4.3).

Столкновение молекулы со стенкой

Пусть скорость $\vec{v}_i$ молекулы с номером i направлена под произвольным углом к стенке (рис. 4.4). При столкновении проекция скорости на ось X v_{ix} меняет знак, а проекции скорости на направления, совпадающие с осями Y и Z, v_{iy} и v_{iz}, остаются без изменения. После соударения

$$v'_{ix} = -v_{ix},\ \ v'_{iy} = v_{iy},\ \ v'_{iz} = v_{iz}.$$

Объясняется это тем, что при абсолютно упругом ударе отсутствуют силы, параллельные стенке. Изменение проекций импульса молекулы на ось X равно

$$m_0 v'_{ix} - m_0 v_{ix} = -2m_0 v_{ix}, \qquad (4.4.1)$$

где m_0 — масса молекулы.

Согласно закону сохранения импульса стенке сосуда молекулой будет передан импульс $2m_0v_{ix}$. Следовательно, в соответствии со вторым законом Ньютона на стенку за время удара подействует импульс силы $2m_0v_{ix}$, направленный перпендикулярно стенке.

Число соударений со стенкой молекул, скорости которых близки к v_{ix}

За время Δt стенки могут достичь лишь молекулы со скоростями $v_{ix} > 0$, которые находятся от неё на расстоянии, не превышающем $v_{ix}\Delta t$ (рис. 4.5). Эти молекулы движутся сле-

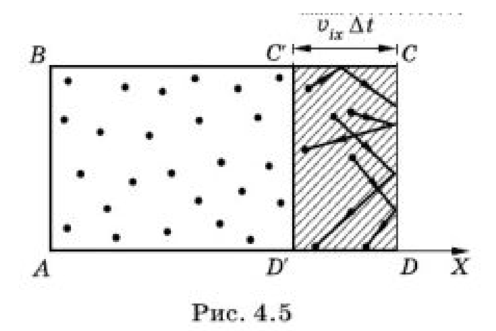


Рис. 4.5

ва направо. Молекулы, находящиеся на бóльших расстояниях, не успеют долететь до стенки*.

Не надо думать, что значения проекций скоростей v_{iy} и v_{iz} как-то влияют на достижение молекулами стенки CD. Если молекула столкнётся со стенкой BC или AB (см. рис. 4.5), то проекция скорости v_{ix} при этом не изменится и молекула сместится вдоль оси X по-прежнему на отрезок $v_{ix}\Delta t$.

Выделенный объём $CC'DD'$ равен $v_{ix}\Delta tS$. Число молекул в этом объёме со скоростями, близкими к v_{ix}, составляет

$$\Delta z_i = n_i v_{ix} \Delta t S, \qquad (4.4.2)$$

где n_i — число молекул со скоростями, близкими к $v_{ix} > 0$, в 1 см^3.

Импульс, переданный стенке молекулами со скоростями $v_{ix} > 0$

Переданный молекулами (их число равно Δz_i) импульс равен произведению Δz_i на импульс, переданный одной молекулой (определяется по формуле (4.4.1)):

$$\Delta z_i 2m_0 v_{ix} = 2m_0 v_{ix}^2 n_i S \Delta t. \qquad (4.4.3)$$

---

* Заметим, что столкновения молекул друг с другом не влияют на число их столкновений со стенкой. Если какая-либо молекула, у которой $v_{ix} > 0$, из-за столкновений не сможет достигнуть стенки, то её место займёт какая-то другая молекула. Давление определяется средним числом молекул с различными скоростями, которое не меняется в состоянии теплового равновесия при столкновениях.

Импульс средней силы, действующий на стенку со стороны всех молекул

Молекулы со скоростями, близкими к υ_{ix}, за время Δt меняют импульс стенки на $2m_0\upsilon_{ix}^2 n_i S\Delta t$. Изменение импульса стенки за время Δt всеми молекулами, столкнувшимися со стенкой, равно сумме выражений (4.4.3) по скоростям $\upsilon_{ix} > 0$ всех молекул:

$$\sum_{\upsilon_{ix}>0} 2m_0\upsilon_{ix}^2 n_i S\Delta t = 2m_0 S\Delta t \sum_{\upsilon_{ix}>0} n_i \upsilon_{ix}^2. \qquad (4.4.4)$$

Согласно второму закону Ньютона импульс силы $F\Delta t$, действующей на стенку, равен изменению импульса стенки:

$$F\Delta t = 2m_0 S\Delta t \sum_{\upsilon_{ix}>0} n_i \upsilon_{ix}^2. \qquad (4.4.5)$$

Выразим этот импульс силы через средний квадрат проекции скорости на ось X, который согласно формуле (4.3.3) определяется так:

$$\overline{\upsilon_x^2} = \sum_{\upsilon_{ix}} \frac{n_i \upsilon_{ix}^2}{n}, \qquad (4.4.6)$$

где суммирование осуществляется по всем проекциям скоростей, как положительным, так и отрицательным. Но положительные значения проекций скоростей встречаются столь же часто, как и отрицательные. Поэтому

$$\sum_{\upsilon_{ix}>0} n_i \upsilon_{ix}^2 = \frac{1}{2} \sum_{\upsilon_{ix}} n_i \upsilon_{ix}^2,$$

или, учитывая определение среднего квадрата (4.4.6), будем иметь

$$\sum_{\upsilon_{ix}>0} n_i \upsilon_{ix}^2 = \frac{1}{2} n \overline{\upsilon_x^2}. \qquad (4.4.7)$$

Заменяя в уравнении (4.4.5) сумму по проекциям скоростей её выражением (4.4.7), получим средний импульс силы

$$\bar{F}\Delta t = m_0 S\Delta t n \overline{\upsilon_x^2}. \qquad (4.4.8)$$

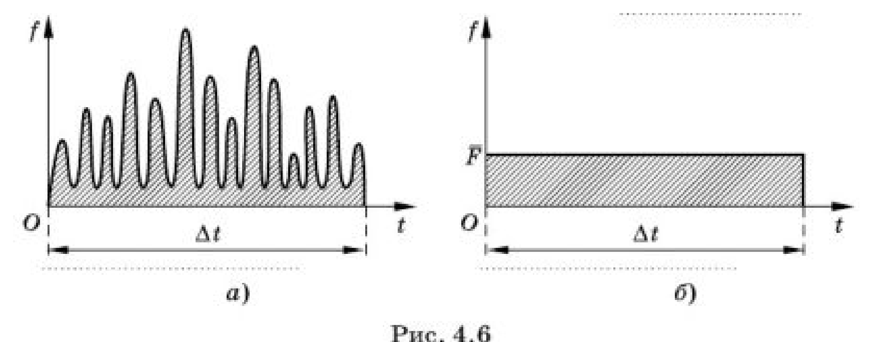


Рис. 4.6

Этот результат можно пояснить графически. На рисунке 4.6, *а* изображена зависимость от времени силы f, действующей на стенку при столкновении с нею различных молекул. Время соударения $\delta t \ll \Delta t$. Сила меняется хаотически в зависимости от времени. Площадь под каждым пиком представляет собой импульс силы, действующей на стенку со стороны одной молекулы при соударении. Суммарная площадь под всеми пиками (её численное значение) даёт импульс силы, действующей на стенку за время Δt. Средний импульс силы $\overline{F}\Delta t$ графически характеризуется площадью прямоугольника (рис. 4.6, *б*), равной суммарной площади импульсов сил от отдельных молекул.

Давление газа

Разделив левую и правую части уравнения (4.4.8) на $S\Delta t$ и учитывая соотношение (4.3.6), найдём давление газа

$$p = \frac{1}{3}m_0 n\overline{v^2}. \qquad (4.4.9)$$



Это и есть основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа*.

Давление идеального газа пропорционально произведению массы молекулы на концентрацию молекул и средний квадрат их скорости.

Формула (4.4.9) связывает макроскопическую величину — давление, которое может быть измерено маномет-

* Это уравнение — первое количественное соотношение, полученное в молекулярно-кинетической теории. Поэтому его принято называть основным.

ром, — с микроскопическими величинами, характеризующими молекулы, и является как бы мостом между двумя мирами: макроскопическим и микроскопическим.

Если через $\bar{E}$ обозначить среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы: $\bar{E} = \frac{m\overline{v^2}}{2}$, то уравнение (4.4.9) можно записать в форме

$$p = \frac{2}{3}n\bar{E}. \qquad (4.4.10)$$

Отметим в заключение, что, хотя расчёт произведён без явного учёта столкновений молекул, это не означает, что столкновения совсем не учитывались нами. Именно огромное число столкновений приводит к тому, что движение молекул является хаотическим. Равенства (4.3.4) и (4.3.6) выполняются с большой точностью как раз вследствие громадного числа столкновений.

Нам удалось вычислить давление идеального газа на стенки сосуда. Оно зависит от концентрации молекул. Кроме того, давление газа пропорционально средней кинетической энергии молекул. Это и есть главный факт.

? 1. Поясните молекулярно-кинетический смысл давления.
2. Выведите основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа.
3. Почему основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа так называется?
4. Как рассчитать давление газа, зная среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул?

§ 4.5. ТЕМПЕРАТУРА — МЕРА СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории газа вытекает важное следствие: температура есть мера средней кинетической энергии молекул. Докажем это.

Для простоты будем считать количество газа равным 1 моль. Молярный объём газа обозначим через V_M. Произведение молярного объёма на концентрацию молекул представляет собой постоянную Авогадро $N_А$, т. е. число молекул в 1 моль.

Умножим обе части уравнения (4.4.10) на молярный объём V_M и учтём, что $nV_M = N_A$. Тогда

$$pV_M = \frac{2}{3}N_A\bar{E}. \qquad (4.5.1)$$

Формула (4.5.1) устанавливает связь макроскопических параметров — давления p и объёма V_M — со средней кинетической энергией поступательного движения молекул.

Вместе с тем полученное опытным путём уравнение состояния идеального газа для 1 моль имеет вид

$$pV_M = RT. \qquad (4.5.2)$$

Левые части уравнений (4.5.1) и (4.5.2) одинаковы, значит, должны быть равны и их правые части, т. е.

$$\frac{2}{3}N_A\bar{E} = RT.$$

Отсюда вытекает связь между средней кинетической энергией поступательного движения молекул и температурой:

$$\bar{E} = \frac{3}{2}\frac{R}{N_A}T. \qquad (4.5.3)$$

Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре. Чем выше температура, тем быстрее движутся молекулы.

Соотношение между температурой и средней кинетической энергией поступательного движения молекул (4.5.3) установлено для разреженных газов. Однако оно оказывается справедливым для любых веществ, движение атомов или молекул которых подчиняется законам механики Ньютона. Оно верно для жидкостей, а также для твёрдых тел, у которых атомы могут лишь колебаться возле положений равновесия в узлах кристаллической решётки.

При приближении температуры к абсолютному нулю энергия теплового движения молекул также приближается к нулю*.

---

* При очень низких температурах (вблизи абсолютного нуля) движение атомов и молекул уже не подчиняется законам Ньютона. Согласно более точным законам движения микрочастиц — законам квантовой механики — абсолютный нуль соответствует минимальному значению энергии движения, а не полному прекращению какого-либо движения вообще.

Постоянная Больцмана

В уравнение (4.5.3) входит отношение универсальной газовой постоянной R к постоянной Авогадро N_A. Это отношение одинаково для всех веществ. Оно называется **постоянной Больцмана**, в честь Л. Больцмана, одного из основателей молекулярно-кинетической теории.

Постоянная Больцмана равна

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8{,}31\ \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}}{6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1}} = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{Дж}}{\text{К}}. \qquad (4.5.4)$$

Уравнение (4.5.3) с учётом постоянной Больцмана записывается так:

$$\boxed{\bar{E} = \frac{3}{2}kT.} \qquad (4.5.5)$$

Физический смысл постоянной Больцмана

Исторически температура была впервые введена как термодинамическая величина, и для неё была установлена единица измерения — градус (см. § 3.2). После установления связи температуры со средней кинетической энергией молекул стало очевидным, что температуру можно определять



Больцман Людвиг (1844—1906) — великий австрийский физик, один из основоположников молекулярно-кинетической теории. В трудах Больцмана молекулярно-кинетическая теория впервые предстала как логически стройная, последовательная физическая теория. Больцман дал статистическое истолкование второго закона термодинамики. Им много сделано для развития и популяризации теории электромагнитного поля Максвелла. Борец по натуре, Больцман страстно отстаивал необходимость молекулярного истолкования тепловых явлений и принял на себя основную тяжесть борьбы с учёными, отрицавшими существование молекул.

как среднюю кинетическую энергию молекул и выражать её в джоулях или эргах, т. е. вместо величины T ввести величину T' так, чтобы

$$T' = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}.$$

Определённая таким образом температура связана с температурой, выражаемой в градусах, следующим образом:

$$T' = \frac{3}{2} kT.$$

Поэтому постоянную Больцмана можно рассматривать как величину, связывающую температуру, выражаемую в энергетических единицах, с температурой, выраженной в градусах.

Зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры

Выразив из соотношения (4.5.5) и подставив в формулу (4.4.10), получим выражение, показывающее зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры:

$$\boxed{p = nkT.} \qquad (4.5.6)$$

Из формулы (4.5.6) вытекает, что при одинаковых давлениях и температурах концентрация молекул у всех газов одна и та же.

Отсюда следует закон Авогадро: в равных объёмах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул прямо пропорциональна абсолютной температуре. Коэффициент пропорциональности — постоянную Больцмана $k \approx 10^{-23}$ Дж/К *— надо запомнить.*

? 1. Выведите взаимосвязь между средней кинетической энергией хаотического движения молекул газа и абсолютной температурой.
2. Объясните физический смысл постоянной Больцмана.
3. Выведите зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры.

§ 4.6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА

В большом числе случаев знание одних средних значений физических величин недостаточно. Например, знание среднего роста людей не позволяет планировать выпуск одежды различных размеров. Надо знать приблизительное число людей, рост которых лежит в определённом интервале.
Точно так же важно знать числа молекул, имеющих скорости, отличные от среднего значения. Максвелл первым нашёл, как эти числа можно определять.

Вероятность случайного события

В § 4.1 мы уже упоминали, что для описания поведения большой совокупности молекул Дж. Максвелл ввёл понятие вероятности.

Как неоднократно подчёркивалось, в принципе невозможно проследить за изменением скорости (или импульса) одной молекулы на протяжении большого интервала времени. Нельзя также точно определить скорости всех молекул газа в данный момент времени. Из макроскопических условий, в которых находится газ (определённый объём и температура), не вытекают с необходимостью определённые значения скоростей молекул. Скорость молекулы можно рассматривать как случайную величину, которая в данных макроскопических условиях может принимать различные значения, подобно тому как при бросании игральной кости может выпасть любое число очков от 1 до 6 (число граней кости равно шести). Предсказать, какое число очков выпадет при данном бросании кости, нельзя. Но вероятность того, что выпадет, скажем, пять очков, поддаётся определению.

Что же такое вероятность наступления случайного события? Пусть произведено очень большое число N испытаний (N — число бросаний кости). При этом в N' случаях имел место благоприятный исход испытаний (т. е. выпадение пятёрки). Тогда **вероятность данного события равна отношению числа случаев с благоприятным исходом к полному числу испытаний при условии, что это число сколько угодно велико:**

$$W = \lim_{N \to \infty} \frac{N'}{N}. \qquad (4.6.1)$$

Для симметричной кости вероятность любого выбранного числа очков от 1 до 6 равна $\frac{1}{6}$.

Мы видим, что на фоне множества случайных событий обнаруживается определённая количественная закономерность, появляется число. Это число — вероятность — позволяет вычислять средние значения. Так, если произвести 300 бросаний кости, то среднее число выпаданий пятёрки, как это следует из формулы (4.6.1), будет равно $300 \cdot \frac{1}{6} = 50$, причём совершенно безразлично, бросать 300 раз одну и ту же кость или одновременно 300 одинаковых костей.

Несомненно, что поведение молекул газа в сосуде гораздо сложнее движения брошенной игральной кости. Но и здесь можно надеяться обнаружить определённые количественные закономерности, позволяющие вычислять статистические средние, если только ставить задачу так же, как в теории игр, а не как в классической механике. Нужно отказаться от неразрешимой задачи определения точного значения скорости молекулы в данный момент и попытаться найти вероятность того, что скорость имеет определённое значение.

Распределение молекул по скоростям — распределение Максвелла

Максвелл допустил, что в газах в состоянии теплового равновесия существует некоторое распределение скоростей, не изменяющееся с течением времени, иными словами, число молекул, имеющих скорости в заданном интервале значений, остаётся постоянным. И Максвелл нашёл это распределение.

Но главная заслуга Максвелла состояла не столько в решении этой задачи, сколько в самой постановке новой проблемы. Он ясно осознал, что случайное в данных макроскопических условиях поведение отдельных молекул подчинено определённому вероятностному, или статистическому, закону. Этот статистический закон для распределения молекул газа по скоростям оказался сравнительно простым.

Наглядно распределение молекул по скоростям можно представить следующим образом. Выберем прямоугольную систему отсчёта, на осях которой будем откладывать проекции υ_x, υ_y, υ_z скоростей частиц. В результате получится трёхмерное «пространство скоростей», каждая точка которого соответствует молекуле со строго заданной скоростью υ, рав-

ной по модулю длине радиуса-вектора, проведённого из начала системы отсчёта в эту точку (рис. 4.7).

Общее представление о распределении молекул по скоростям получится, если скорость каждой из N молекул изобразить точкой в этом пространстве скоростей (рис. 4.8). Точки окажутся расположенными довольно хаотически, но в среднем плотность точек будет убывать по мере удаления от начала отсчёта (не все значения скоростей молекул встречаются одинаково часто). Картина распределения точек, конечно, не является застывшей. С течением времени скорости молекул за счёт столкновений меняются и, следовательно, меняется картина распределения точек в пространстве скоростей. Однако её изменение таково, что средняя плотность точек в любой области пространства скоростей со временем не будет изменяться, она остаётся одной и той же. Именно это и означает существование определённого статистического закона. Средней плотности соответствует наиболее вероятное распределение скоростей.

Число точек ΔN в некотором малом объёме $\Delta \upsilon_x \Delta \upsilon_y \Delta \upsilon_z$ пространства скоростей, очевидно, равно этому объёму, помноженному на плотность точек внутри него. (Аналогично масса Δm некоторого объёма ΔV равна произведению плотности вещества ρ на этот объём: $\Delta m = \rho \Delta V$.) Обозначим через $Nf(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$ среднюю плотность точек в пространстве скоростей, т. е. число точек, приходящихся на единицу объёма пространства скоростей (N — общее число молекул газа). Тогда



$$\Delta N = Nf(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)\Delta \upsilon_x \Delta \upsilon_y \Delta \upsilon_z. \quad (4.6.2)$$

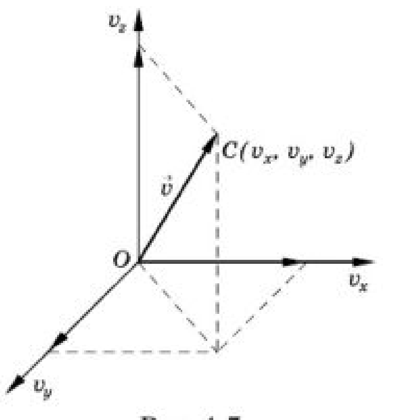


Рис. 4.7

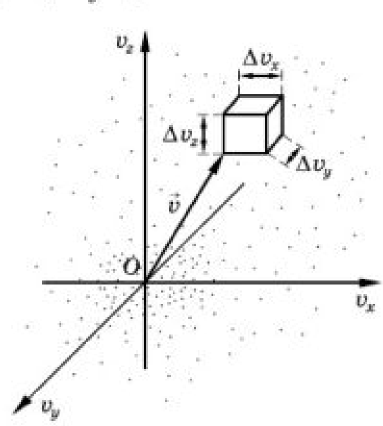


Рис. 4.8

Фактически ΔN — это число молекул, проекции скоростей которых лежат в интервалах значений от v_x до $v_x + \Delta v_x$, от v_y до $v_y + \Delta v_y$ и от v_z до $v_z + \Delta v_z$ (радиусы-векторы скоростей этих молекул оканчиваются внутри объёма пространства скоростей $\Delta v = \Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z$, имеющего форму куба (см. рис. 4.8).

Вероятность того, что проекции скорости молекулы лежат в заданном интервале скоростей, равна отношению числа молекул с данным значением скорости к полному числу молекул:

$$\Delta W = \frac{\Delta N}{N} = f(v_x, v_y, v_z)\Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z. \qquad (4.6.3)$$

Функция $f(v_x, v_y, v_z)$ называется функцией распределения молекул по скоростям и представляет собой плотность вероятности, т. е. вероятность, отнесённую к единичному объёму пространства скоростей.

Скорости молекул в данный момент времени в принципе могут оказаться любыми. Но вероятность различных распределений скоростей неодинакова. Среди всех возможных мгновенных распределений имеется одно, вероятность которого больше, чем всех других, — наиболее вероятное распределение. Максвелл установил, что функция распределения $f(v_x, v_y, v_z)$, дающая это *наивероятнейшее распределение скоростей молекул* (распределение Максвелла), определяется отношением кинетической энергии молекулы $\frac{m_0 v^2}{2} = \frac{m_0}{2}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$ к средней энергии её теплового движения kT (k — постоянная Больцмана). Это распределение имеет вид

$$f(v_x, v_y, v_z) = Ae^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}. \qquad (4.6.4)$$

Здесь $e \approx 2,718$ — основание натуральных логарифмов, а величина A не зависит от скорости.

Таким образом, по Максвеллу, плотность точек, изображающих молекулы в пространстве скоростей, максимальна вблизи начала отсчёта ($v = 0$) и убывает с ростом v, причём тем быстрее, чем меньше энергия теплового движения kT. На рисунке 4.9 представлена зависимость функции распределения f от проекции v_x при условии, что проекции v_y и v_z любые. Функция распределения имеет характерную колоколообразную форму, которая часто встречается в статистиче-

ских теориях и называется кривой Гаусса.

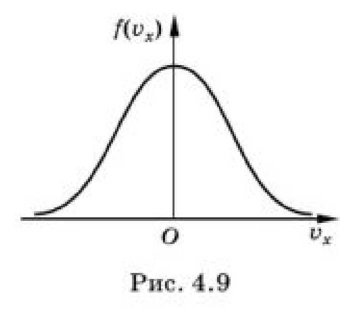


Рис. 4.9

Постоянную A находят из условия, что вероятность для скорости молекулы иметь любое значение от нуля до бесконечности должна равняться единице. Это условие называется *условием нормировки*. (Аналогично вероятность выпадания любого числа очков от 1 до 6 при данном бросании игральной кости равна единице.) Полная вероятность получается сложением вероятностей всех возможных взаимоисключающих реализаций случайного события.

Суммируя вероятности ΔW_i всех возможных значений скорости $\vec{v}_i$, получим уравнение

$$\sum_i \Delta W_i = \sum_i f(v_{ix}, v_{iy}, v_{iz}) \Delta v_{ix} \Delta v_{iy} \Delta v_{iz} = 1. \qquad (4.6.5)$$

Вычислив с помощью уравнения (4.6.5) нормировочную постоянную A, можно записать выражение для среднего числа частиц со скоростями в заданном интервале в следующей форме:

$$\Delta N(v) = N\left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} \Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z. \qquad (4.6.6)$$

Скорость любой молекулы в данный момент времени — случайная величина. Поэтому и само распределение молекул по скоростям в данный момент времени случайно. Но среднее распределение, определяемое статистическим законом, реализуется с необходимостью в определённых макроскопических условиях и не меняется со временем. Однако всегда есть отклонения от средних — *флуктуации*. Эти отклонения с равной вероятностью происходят в ту и в другую сторону. Именно поэтому в среднем имеется определённое распределение молекул по скоростям.

Распределение молекул по скоростям Максвелла оказывается справедливым не только для газов, но и для жидкостей и твёрдых тел. Лишь в том случае, когда для описания движения частиц нельзя применить классическую механику, распределение Максвелла перестаёт быть верным.

Распределение модулей скоростей молекул

Найдём среднее число молекул, скорости которых по модулю лежат в интервале от v до $v + \Delta v$.

Распределение Максвелла (4.6.4) определяет число молекул, проекции скоростей которых лежат в интервалах значений от v_x до $v_x + \Delta v_x$, от v_y до $v_y + \Delta v_y$, от v_z до $v_z + \Delta v_z$. Векторы этих скоростей оканчиваются внутри объёма $\Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z$ (см. рис. 4.8). Таким образом задаётся среднее число молекул, имеющих определённый модуль и определённое направление скоростей, задаваемые положением объёма $\Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z$ в пространстве скоростей.

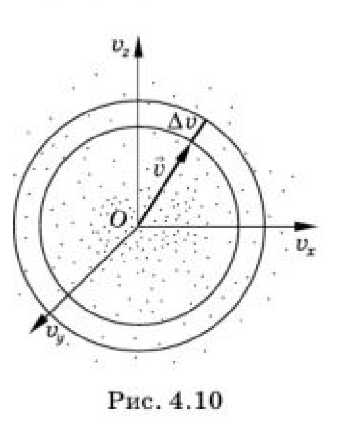


Рис. 4.10

Все молекулы, модули скоростей которых лежат в интервале от v до $v + \Delta v$, располагаются в пространстве скоростей внутри шарового слоя радиусом v и толщиной Δv (рис. 4.10). Объём шарового слоя равен произведению площади поверхности слоя на его толщину: $4\pi v^2 \Delta v$. Число молекул, находящихся внутри этого слоя и, следовательно, обладающих заданными значениями модуля скорости в интервале от v до $v + \Delta v$, может быть найдено из формулы (4.6.2), если заменить объём $\Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z$ на объём $4\pi v^2 \Delta v$.

Таким образом, искомое среднее число молекул равно

$$\Delta N(v) = Nf(v)4\pi v^2 \Delta v = N\left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} 4\pi v^2 \Delta v. \quad (4.6.7)$$

Так как вероятность определённого значения модуля скорости молекулы равна отношению $\frac{\Delta N}{N}$, то для плотности вероятности получим

$$f(v) = \frac{\Delta N}{N \Delta v} = 4\pi\left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} v^2. \quad (4.6.8)$$

График, выражающий зависимость этой функции от скорости, показан на рисунке 4.11. Мы видим, что функция $f(v)$ имеет максимум уже не в нуле, как плотность вероятности $f(v_x, v_y, v_z)$. Причина этого состоит в следующем. Плот-

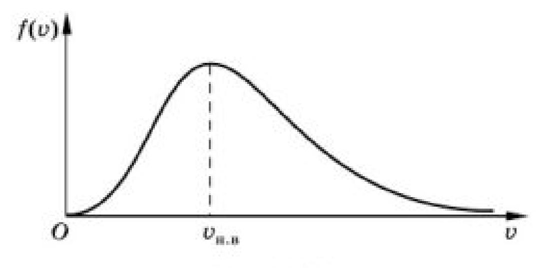


Рис. 4.11

ность точек, изображающих молекулы в пространстве скоростей, по-прежнему будет наибольшей вблизи $v = 0$, но за счёт роста объёмов шаровых слоёв с увеличением модулей скоростей ($\sim v^2$) происходит увеличение функции $f(v)$. При этом число точек внутри шарового слоя растёт быстрее, чем убывает функция $f(v_x, v_y, v_z)$ вследствие уменьшения плотности точек.

Можно пояснить сказанное наглядным примером. Допустим, обычную мишень с концентрическими кругами обстреливает достаточно меткий стрелок. Попадания пуль концентрируются вокруг центра мишени. Плотность попаданий — число попаданий на единицу площади — будет максимальной вблизи центра мишени. Разделим мишень на отдельные узкие полоски шириной Δx (рис. 4.12, *а*). Тогда отношение числа попаданий на данную полоску к её ширине будет максимально вблизи центра мишени. Зависимость отношения числа попаданий в данную полоску к её ширине имеет вид, показанный на рисунке 4.12, *б*. Здесь опять получается гауссова кривая, как и для распределения $f(v_x)$ по проекциям скоростей (см. рис. 4.9).

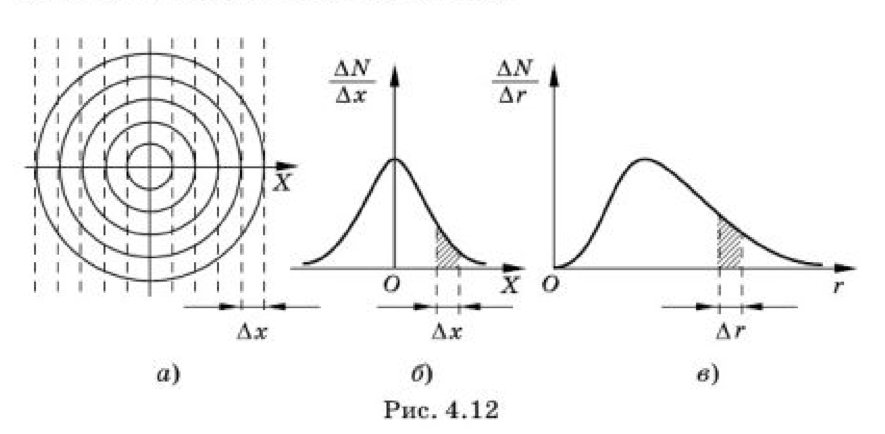


Рис. 4.12

Но совсем другой результат получится, если подсчитывать число попаданий в различные кольца мишени. В этом случае отношение числа попаданий в кольцо радиусом r к его ширине графически будет характеризоваться кривой, изображённой на рисунке 4.12, *в*. Хотя плотность попаданий по мере удаления от центра мишени убывает, но площади колец растут пропорционально r, что и приводит к смещению максимума кривой от нуля.

Наиболее вероятная скорость молекул

Зная формулу (4.6.8) для плотности вероятности модулей скоростей молекул, можно найти значение скорости, соответствующей максимуму плотности этой вероятности*. Скорость (её называют **наиболее вероятной**) оказывается равной

$$v_{\text{н. в}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}. \qquad (4.6.9)$$

Большинство молекул имеют скорости, близкие к наиболее вероятной (см. рис. 4.11).

По мере увеличения абсолютной температуры T наиболее вероятная скорость увеличивается и при этом кривая зависимости $f(v)$ становится всё более сглаженной (рис. 4.13).

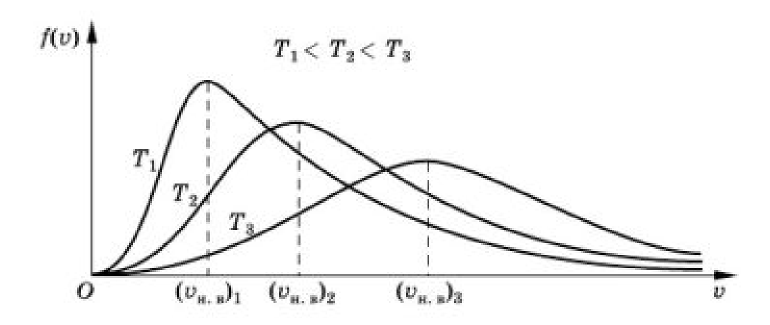


Рис. 4.13

---

* Это делается по правилам нахождения максимума известной функции. Нужно вычислить производную этой функции по скорости и приравнять её нулю.

Роль быстрых молекул

При любой температуре имеется некоторое количество молекул, скорости которых, а значит, и кинетические энергии, заметно превышают средние.

Известно, что многие химические реакции, например горение обычных видов топлива (дрова, уголь и т. д.), начинаются только при определённой, достаточно высокой температуре. Энергия, необходимая для начала процесса окисления топлива, т. е. горения (её называют энергией активации), имеет порядок 10^{-19} Дж. А при температуре 293 К (комнатная температура) средняя кинетическая энергия теплового движения молекул составляет примерно $5 \cdot 10^{-21}$ Дж, поэтому горение не происходит. Однако увеличение температуры всего лишь в 2 раза (до 586 К) вызывает воспламенение. Средняя энергия молекул увеличивается при этом тоже в 2 раза, но число молекул, кинетическая энергия которых превышает 10^{-19} Дж, увеличивается в 10^8 раз. Это следует из распределения Максвелла. Поэтому при температуре 293 К вы чувствуете себя, читая книгу, комфортно, а при 586 К книга начинает гореть.

Испарение жидкости также определяется быстрыми молекулами правого «хвоста» максвелловского распределения. Энергия связи молекул воды при комнатной температуре значительно больше kT. Тем не менее испарение происходит за счёт небольшого числа быстрых молекул, у которых кинетическая энергия превышает kT.

Максвелл открыл новый тип физического закона — статистический — и нашёл распределение молекул по скоростям. Он отчётливо понимал значение своего открытия. В докладе Кембриджскому философскому обществу Максвелл сказал: «Я считаю, что наиболее важное значение для развития наших методов мышления молекулярные теории имеют потому, что они заставляют делать различие между двумя методами познания, которые мы можем назвать динамическим и статистическим».

? 1. Назовите имя учёного, открывшего новый тип физического закона (статистический закон).
2. Что характеризует функция распределения молекул по скоростям, по проекциям скоростей?
3. Изобразите функции распределения молекул по скоростям, по проекциям скоростей для различных температур.

4. Какая скорость называется наиболее вероятной, средней арифметической?
5. Выделите на графике распределения Масквелла область, соответствующую быстрым молекулам. Поясните их «роль» в физических процессах.

§ 4.7. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ МОЛЕКУЛ ГАЗА

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов (4.4.9) было получено на основе модели идеального газа. При этом было сделано несколько упрощающих реальную картину предположений. Чтобы убедиться в допустимости сделанных предположений, нужно проверить экспериментально вытекающие из уравнения (4.4.9) следствия. Одним из главных следствий основного уравнения молекулярно-кинетической теории является зависимость среднего квадрата скорости теплового движения молекул (микроскопическая характеристика газа) от температуры (макроскопической характеристики состояния газа). Эту зависимость и можно проверить экспериментально.

Средняя скорость теплового движения молекул

Из сопоставления уравнения (4.4.9) с термодинамическим уравнением состояния идеального газа было получено выражение (4.5.5) для средней кинетической энергии поступательного движения молекул

$$\overline{E} = \frac{m_0\overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2}kT.$$

Отсюда средний квадрат скорости поступательного движения равен

$$\overline{v^2} = \frac{3kT}{m_0}. \qquad (4.7.1)$$

Квадратный корень из этой величины называется средней квадратичной скоростью:

$$\bar{v} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \qquad (4.7.2)$$

Средняя квадратичная скорость мало отличается от наиболее вероятной скорости, определяемой выражением (4.6.9).

Так как постоянная Больцмана равна отношению универсальной газовой постоянной к постоянной Авогадро $\left(k = \frac{R}{N_А}\right)$, а массу молекулы можно выразить через её молярную массу $\left(m_0 = \frac{M}{N_А}\right)$, то из формулы (4.7.2) получается

$$\overline{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \qquad (4.7.3)$$

Вычисленные по этой формуле скорости $\overline{v}$ для различных газов при $t = 0$ °C ($T = 273$ К) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Газ	$\overline{v}$, м/с	Газ	$\overline{v}$, м/с
Водород	1838	Кислород	461
Азот	493	Углекислый газ	393

Как видно из таблицы, скорости молекул очень велики — порядка скорости артиллерийских снарядов — и несколько больше скорости звука в соответствующем газе. На первых порах такой результат вызвал замешательство среди физиков. Ведь если скорости молекул столь велики, то как объяснить, например, что запах духов, пролитых в комнате, распространяется довольно медленно; должно пройти несколько секунд, чтобы запах распространился по всей комнате. Однако объяснить этот факт оказалось довольно просто. Молекулы газа, несмотря на свои малые размеры, непрерывно сталкиваются друг с другом. Из-за большой скорости движения молекул число столкновений молекул воздуха в 1 с при нормальных атмосферных условиях достигает нескольких миллиардов. Средняя длина свободного пробега молекулы

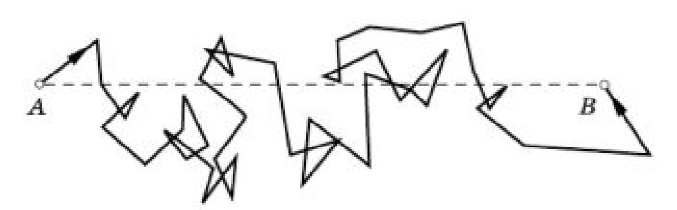


Рис. 4.14

оказывается равной 10^{-4}—10^{-5} см. Поэтому траектория каждой молекулы представляет собой очень запутанную ломаную линию (рис. 4.14). Большие скорости молекула имеет на прямолинейных отрезках ломаной. Перемещение же молекулы в каком-либо направлении в среднем невелико даже за время порядка нескольких секунд. При перемещении молекулы из точки A в точку B пройденный ею путь оказывается гораздо больше расстояния AB.

Экспериментальное определение скоростей молекул

Опыты по определению скорости молекул доказали справедливость формулы (4.7.3). Один из опытов был осуществлён немецким физиком О. Штерном в 1920 г.

Схема опыта показана на рисунке 4.15. Прибор состоит из сосуда *1*, системы диафрагм *2*, *3* и цилиндра *4*, вращающегося с большой угловой скоростью ω.

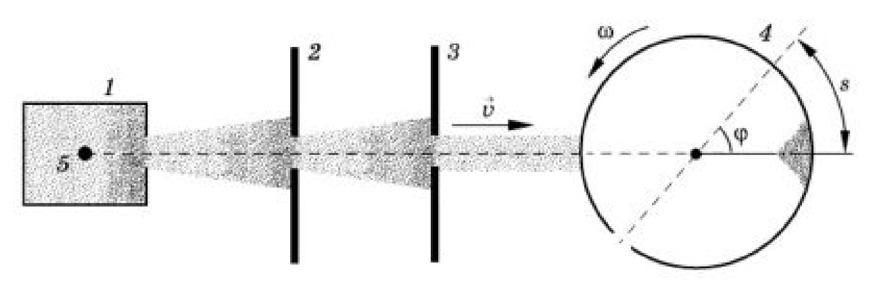


Рис. 4.15

В сосуде *1* натянута тонкая платиновая проволочка *5*, покрытая слоем серебра. По проволочке пропускают электрический ток. При прохождении тока слой серебра испаряется и сосуд заполняется газом из атомов серебра. Газ находится в равновесном состоянии при температуре T, которую можно измерить.

В стенке сосуда *1* имеется маленькое отверстие, через которое небольшое количество атомов серебра вылетает из сосуда в пространство, где создан высокий вакуум. Здесь атомы практически не сталкиваются друг с другом.

С помощью диафрагм *2*, *3* выделяется пучок атомов, направленный вдоль диаметра вращающегося цилиндра. В цилиндре имеется узкая щель. В момент, когда щель оказывается на пути пучка, небольшая порция атомов попадает

внутрь цилиндра и движется к его противоположной стенке. Расстояние, равное диаметру цилиндра D, эти атомы пролетают за время $\tau = \frac{D}{\overline{v}}$, где $\overline{v}$ — среднее значение скорости. За это время цилиндр повернётся на угол $\varphi = \omega\tau = \frac{\omega D}{\overline{v}}$. Если бы цилиндр был неподвижен, то атомы осаждались бы на его внутренней поверхности прямо против щели. Но при вращении цилиндра атомы попадают на участок цилиндра, смещённый на расстояние $s = \frac{D\varphi}{2} = \frac{\omega D^2}{2\overline{v}}$ от точки, лежащей на одном диаметре с щелью (см. рис. 4.15).

На внутренней поверхности цилиндра образуется след от осаждённого серебра в виде тёмного пятна. Толщина пятна не везде одинакова. На определённом участке толщина слоя серебра максимальна. Измерив длину дуги s, соответствующую наибольшей толщине слоя серебра, и зная диаметр цилиндра и его угловую скорость, можно определить среднюю скорость молекул по формуле

$$\overline{v} = \frac{\omega D^2}{2s}. \qquad (4.7.4)$$

Согласие со значением средней квадратичной скорости, вычисленной по формуле (4.7.3), оказывается вполне удовлетворительным. Это служит экспериментальным доказательством справедливости формулы (4.7.3), а значит, и выражения (4.5.5), из которого следует, что средняя кинетическая энергия прямо пропорциональна абсолютной температуре.

Измеряя толщину пятна серебра в разных местах, можно приблизительно подсчитать число атомов, скорости которых лежат в тех или иных интервалах. Таким образом осуществляется опытная проверка максвелловского распределения молекул по скоростям. Согласие с экспериментом для распределения Максвелла также оказывается удовлетворительным.

Средняя скорость броуновской частицы

Формула (4.7.2) позволяет понять, почему интенсивность броуновского движения возрастает с повышением температуры жидкости и уменьшается при увеличении массы частицы. Ведь броуновская частица участвует в тепловом движе-

нии молекул. Поэтому её средняя кинетическая энергия также определяется формулой (4.5.5), а средняя квадратичная скорость — формулой

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_б}},$$

где $m_б$ — масса броуновской частицы. Если масса частицы велика, то средняя скорость её движения настолько мала, что движение частицы практически обнаружить нельзя.

Скорость броуновской частицы в жидкости измерить непосредственно невозможно из-за крайней нерегулярности броуновского движения.

Средние скорости молекул превышают скорость звука и достигают сотен метров в 1 с. Эти скорости удалось измерить благодаря тому, что макроскопическому телу (цилиндру в опыте Штерна) можно сообщить столь большую угловую скорость, что за время пролёта молекул внутри цилиндра он поворачивается на заметную величину.

? 1. Сформулируйте главное следствие молекулярно-кинетической теории.
2. Как рассчитать среднюю квадратичную скорость движения молекул?
3. Опишите опыт Штерна. Почему в настоящее время существуют различные модификации опыта Штерна?

§ 4.8. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

При изучении тепловых явлений наряду с механической энергией тел вводится новый вид энергии — внутренняя энергия. Вычислить внутреннюю энергию идеального газа не составляет большого труда.

Наиболее прост по своим свойствам одноатомный газ, т. е. газ, состоящий из отдельных атомов, а не молекул. Одноатомными являются инертные газы — гелий, неон, аргон и др. Можно получить одноатомный (атомарный) водород, кислород и т. д. Однако такие газы будут неустойчивыми, так как при столкновениях атомов образуются молекулы H_2, O_2 и др.

Молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, кроме моментов непосредственного столкновения. Поэтому их средняя потенциальная энергия очень мала и *вся энергия представляет собой кинетическую энергию хаотического движения молекул*. Это, конечно, справедливо, если сосуд с газом покоится, т. е. газ как целое не движется (его центр масс находится в покое). В этом случае упорядоченное движение отсутствует и механическая энергия газа равна нулю. Газ обладает энергией, которую называют внутренней.

Для вычисления внутренней энергии идеального одноатомного газа массой m нужно умножить среднюю энергию одного атома, выражаемую формулой (4.5.5), на число атомов. Это число равно произведению количества вещества $\nu = \frac{m}{M}$ на постоянную Авогадро N_A.

Умножая выражение (4.5.5) на $\frac{m}{M}N_A$, получим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа:

$$U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT. \qquad (4.8.1)$$

Внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре. От объёма газа она не зависит. *Внутренняя энергия газа представляет собой среднюю кинетическую энергию всех его атомов.*

Если центр масс газа движется со скоростью v_0, то полная энергия газа равна сумме механической (кинетической) энергии $\frac{mv_0^2}{2}$ и внутренней энергии U:

$$\bar{E} = \frac{mv_0^2}{2} + \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT. \qquad (4.8.2)$$

Внутренняя энергия молекулярных газов

Внутренняя энергия одноатомного газа (4.8.1) — это по существу средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул. В отличие от атомов молекулы, лишённые сферической симметрии, могут ещё вращаться. Поэтому наряду с кинетической энергией поступательного движения молекулы обладают и кинетической энергией вращательного движения.

В классической молекулярно-кинетической теории атомы и молекулы рассматриваются как очень маленькие абсолютно твёрдые тела. Любое тело в классической механике характеризуется определённым **числом степеней свободы** f — числом независимых переменных (координат), однозначно определяющих положение тела в пространстве. Соответственно число независимых движений, которые тело может совершать, также равно f. Атом можно рассматривать как однородный шарик с числом степеней свободы $f = 3$ (рис. 4.16, *а*). Атом может совершать только поступательное движение по трём независимым взаимно перпендикулярным направлениям. Двухатомная молекула обладает осевой симметрией (рис. 4.16, *б*) и имеет пять степеней свободы. Три степени свободы соответствуют её поступательному движению и две — вращательному вокруг двух осей, перпендикулярных друг другу и оси симметрии (линии, соединяющей центры атомов в молекуле). Многоатомная молекула, подобно твёрдому телу произвольной формы, характеризуется шестью степенями свободы (рис. 4.16, *в*); наряду с поступательным движением молекула может совершать вращения вокруг трёх взаимно перпендикулярных осей.

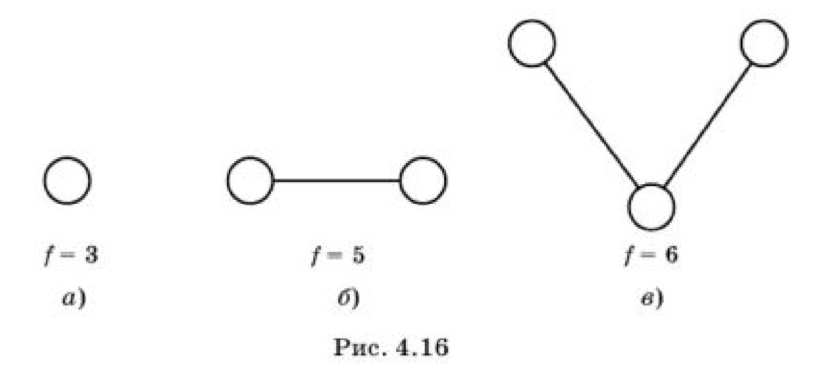


Рис. 4.16

От числа степеней свободы молекул зависит внутренняя энергия газа. Вследствие полной беспорядочности теплового движения ни один из видов движения молекулы не имеет преимущества перед другим. На каждую степень свободы, соответствующую поступательному или вращательному движению молекул, приходится одна и та же средняя кинетическая энергия. В этом состоит теорема о равномерном распределении кинетической энергии по степеням свободы (она строго доказывается в статистической механике).

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул равна $\frac{3}{2}kT$. Поступательному движению соответствуют три степени свободы. Следовательно, средняя кинетическая энергия $\bar{E}$, приходящаяся на одну степень свободы, равна

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{2}kT. \qquad (4.8.3)$$

Если эту величину умножить на число степеней свободы и число молекул газа массой m, то получится внутренняя энергия произвольного идеального газа:

$$U = \frac{f}{2}\frac{m}{M}RT. \qquad (4.8.4)$$

Эта формула отличается от формулы (4.8.1) для одноатомного газа заменой множителя 3 на множитель f.

Внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна абсолютной температуре и не зависит от объёма газа.

?

1. Дайте определение понятия «внутренняя энергия идеального газа».
2. Поясните смысл фразы: «Внутренняя энергия — функция состояния».
3. Как связана внутренняя энергия идеального газа с его абсолютной температурой?
4. Сформулируйте определение понятия «степень свободы».
5. Чем отличаются формулы для определения внутренней энергии идеального газа и молекулярных газов?

§ 4.9. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач на применение молекулярно-кинетической теории идеального газа используются основное уравнение кинетической теории газов в форме (4.4.9) или (4.4.10) и вытекающие из него выражения для средней кинетической энергии молекул (4.5.5) и средней квадратичной скорости (4.7.2) или (4.7.3). Значительное количество задач удобно решать, используя формулу (4.5.6), связывающую давление газа с концентрацией молекул и абсолютной температурой. Внутренняя энергия идеальных одноатомных газов (например, инертных газов) вычисляется по формуле (4.8.1).

Задача 1

Чему равна масса газа, содержащегося в закрытом цилиндре вместимостью $V = 0{,}5$ л, если давление газа $p = 5 \cdot 10^5$ Па, а средняя квадратичная скорость молекул $\bar{v} = 500$ м/с?

Решение. Согласно основному уравнению молекулярно-кинетической теории

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2} = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2,$$

где $\rho = m_0 n$ — плотность газа. Но $\rho = \frac{m}{V}$, где m — масса газа, а V — его объём. Поэтому

$$p = \frac{1}{3} \frac{m}{V} \bar{v}^2.$$

Откуда

$$m = \frac{3pV}{\bar{v}^2} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Задача 2

В воздухе при $t = 27$ °C взвешены пылинки сферической формы. Радиус пылинок $r = 10^{-6}$ м. Плотность вещества пылинок $\rho = 1{,}3 \cdot 10^3$ кг/м^3. Определите средний квадрат скорости пылинок.

Решение. Пылинки принимают участие в броуновском движении. Средний квадрат скорости пылинки

$$\overline{v^2} = \frac{3kT}{m_б},$$

где $m_б$ — масса пылинки.

Следовательно,

$$\overline{v^2} = \frac{9kT}{4\pi r^3 \rho} \approx 2{,}3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^2.$$

Задача 3

В сосуде находится 1 л воды при температуре 27 °C. Каким стало бы давление внутри сосуда, если бы силы взаимодействия между молекулами внезапно исчезли?

Решение. При исчезновении сил взаимодействия между молекулами вода превратилась бы в идеальный газ. Дав-

ление можно найти по уравнению состояния идеального газа:

$$p = \frac{m}{M}\frac{RT}{V} \approx 1370 \text{ атм.}$$

Задача 4

Два сосуда, содержащих различные газы, соединены трубкой с краном. Давление газа в первом сосуде p_1, а число молекул N_1. Давление газа во втором сосуде p_2, число молекул N_2. Какое давление установится в сосудах, если открыть кран соединительной трубки? Температуру считать постоянной.

Решение. Согласно формуле (4.5.6)

$$p_1 = n_1 kT \text{ и } p_2 = n_2 kT,$$

где

$$n_1 = \frac{N_1}{V_2},\ n_2 = \frac{N_2}{V_2}$$

(здесь V_1 и V_2 — объёмы сосудов).

Следовательно,

$$p_1 V_1 = N_1 kT,$$

$$p_2 V_2 = N_2 kT.$$

После того как кран будет открыт, давления выравняются и искомое давление согласно той же формуле (4.5.6) определится уравнением

$$p(V_1 + V_2) = (N_1 + N_2)kT.$$

Подставляя сюда выражения для объёмов из предыдущих формул, получим

$$p = \frac{p_1 p_2 (N_1 + N_2)}{p_1 N_2 + p_2 N_1}.$$

Задача 5

Плотность газа в баллоне газополной электрической лампы $\rho = 0{,}9$ кг/м^3. При горении лампы давление в ней возросло с $p_1 = 8 \cdot 10^4$ Па до $p_2 = 1{,}1 \cdot 10^5$ Па. На сколько увеличилась при этом средняя квадратичная скорость молекул?

Решение. Плотность газа $\rho = m_0 n$, и основное уравнение молекулярно-кинетической теории можно записать в форме

$$p = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2}.$$

Поэтому

$$\bar{v}_1 = \sqrt{\frac{3p_1}{\rho}}, \quad \bar{v}_2 = \sqrt{\frac{3p_2}{\rho}},$$

откуда

$$\bar{v}_2 - \bar{v}_1 = \sqrt{\frac{3}{\rho}}(\sqrt{p_2} - \sqrt{p_1}) = 90 \text{ м/с}.$$

Упражнение 3

1. При какой температуре молекулы кислорода имеют такую же среднюю квадратичную скорость, что и молекулы азота при температуре 100 °С?

2. На стенку площадью S налетает поток молекул со средней скоростью $\bar{v}$. Число молекул, движущихся по направлению к стенке, в единице объёма n_0, масса каждой молекулы m_0. Найдите действующую на стенку силу и давление, если молекулы движутся перпендикулярно стенке и удары молекул о стенку абсолютно неупругие.

3. Какое давление на стенки сосуда производит водород, если число молекул в 1 см^3 равно $4{,}1 \cdot 10^{18}$, а средняя квадратичная скорость его молекул 2400 м/с?

4. Определите число молекул кислорода в 1 м^3, если давление равно 77 кПа, а средняя квадратичная скорость его молекул 400 м/с.

5. Определите плотность газа, молекулы которого производят на стенки сосуда давление $1{,}6 \cdot 10^5$ Па. Средняя квадратичная скорость молекул 800 м/с.

6. Какова средняя квадратичная скорость молекул газа, который занимает объём 1,3 м^3 при давлении $5 \cdot 10^4$ Па? Масса газа 60 г.

7. В цилиндре вместимостью 1,2 л содержится газ под давлением 10^5 Па. Среднее значение кинетической энергии каждой молекулы равно $6 \cdot 10^{-21}$ Дж. Сколько молекул газа находится в цилиндре?

8. Сколько молекул воздуха выходит из комнаты объёмом V_0 при повышении температуры от T_1 до T_2? Атмосферное давление равно p_0.

9. Плотность смеси азота и водорода при температуре $t = 47$ °С и давлении $p = 2$ атм равна $\rho = 0,3$ г/л. Найдите концентрации молекул азота и водорода в смеси.

10. Ампула объёмом $V = 1$ см^3, содержащая воздух при нормальных условиях, оставлена в космосе, где давление можно считать равным нулю. В ампуле проделано отверстие. Через какое время давление в ампуле станет равным нулю, если считать, что через отверстие каждую секунду вылетает 100 млн молекул?

11. При повышении температуры идеального газа на 150 К средняя квадратичная скорость его молекул возросла с 400 до 500 м/с. На сколько надо нагреть этот газ, чтобы увеличить среднюю квадратичную скорость его молекул от 500 до 600 м/с?

12. Изменится ли внутренняя энергия идеального газа при его изотермическом сжатии?

13. Одноатомный газ, находящийся при постоянном давлении $p = 2 \cdot 10^6$ Па в цилиндре под поршнем площадью $S = 160$ см^2, нагревается так, что поршень перемещается на расстояние $\Delta h = 15$ см. Найдите изменение внутренней энергии газа.

---

1. Выявите общее и различное в следующих объектах: «модель на подиуме», «физическая модель», «модель прибора», «модель, собранная с помощью конструктора» (результат представьте в виде таблицы).
2. Можно ли использовать распределение Максвелла для величин из другой области знания (например, экономика — денежная масса, социология — количество людей и т. д.)?
3. С помощью различных графических средств изобразите шкалу скоростей в живой и неживой природе.
4. Можно ли использовать термин «внутренняя энергия» для описания состояния человека? Ответ поясните.

Глава 5

ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Тепловые явления можно описывать с помощью величин (макроскопических параметров), регистрируемых такими приборами, как манометр и термометр. Эти приборы не реагируют на воздействие отдельных молекул. Теория тепловых процессов, в которой не учитывается молекулярное строение тел, называется термодинамикой. Об этом уже упоминалось в главе 1. В этой главе термодинамику мы будем изучать.

§ 5.1. РАБОТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ

В главе 3 мы познакомились с различными процессами, при которых меняется состояние термодинамической системы. У нас речь шла преимущественно об изменении состояния идеального газа при изотермическом, изобарном и изохорном процессах.

Для дальнейшего рассмотрения термодинамических процессов нужно детально исследовать, в результате каких внешних воздействий может меняться состояние любой термодинамической системы. Имеется два существенно различных вида воздействий, которые приводят к изменению состояния системы, т. е. к изменению термодинамических параметров — давления p, объёма V, температуры T, характеризующих состояние. Первый из них — это с о в е р ш е н и е р а б о т ы.

Работа в механике и термодинамике

В механике рассматривается движение макроскопических тел. Работа определяется как произведение модулей силы и перемещения и косинуса угла между направлениями силы и перемещения. Работа совершается при действии силы или нескольких сил на движущееся макроскопическое тело и равна изменению его кинетической энергии.

В термодинамике движение тела как целого не рассматривается и речь идёт о перемещении частей макроскопического тела друг относительно друга. При совершении работы меняется объём тела, а его скорость остаётся равной нулю. Но скорости молекул тела, например газа, меняются. Поэтому меняется и температура тела.

Причина состоит в следующем: при упругих соударениях молекул с движущимся поршнем (для случая сжатия газа) их кинетическая энергия изменяется. Так, при движении навстречу молекулам поршень во время столкновений передаёт им часть своей механической энергии, в результате чего газ нагревается. Поршень действует подобно футболисту, встречающему летящий мяч ударом ноги и сообщающему мячу скорость, значительно большую той, которой он обладал до удара*.

И наоборот, если газ расширяется, то после столкновения с удаляющимся поршнем скорости молекул уменьшаются, в результате чего газ охлаждается. Так же действует футболист: чтобы уменьшить скорость летящего мяча или остановить его, нога футболиста движется от мяча, как бы уступая ему дорогу.

Итак, при совершении работы в термодинамике меняется состояние макроскопических тел: меняется их объём и температура.

Вычисление работы

Вычислим работу в зависимости от изменения объёма на примере газа в цилиндре под поршнем (рис. 5.1). Проще всего вначале вычислить не работу силы $\vec{F}$, действующей на газ со стороны внешнего тела (поршня), а работу, которую совершает сам газ, действуя на поршень с силой $\vec{F'}$. Согласно третьему закону Ньютона $\vec{F} = -\vec{F'}$.

---

* Задача об изменении скорости шарика при упругом соударении его с движущейся стенкой подробно рассмотрена в § 6.12 «Механики» (задача 5).

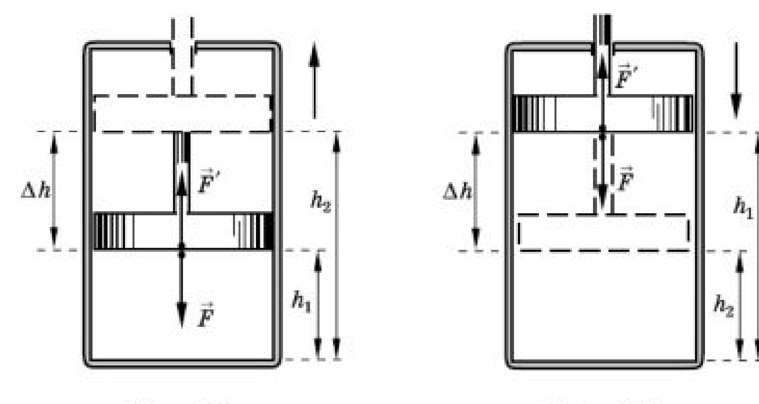


Рис. 5.1 Рис. 5.2

Модуль силы, действующей со стороны газа на поршень, равен $F' = pS$, где p — давление газа, а S — площадь поверхности поршня. Пусть газ расширяется, и поршень смещается в направлении силы на малое расстояние $\Delta h = h_2 - h_1$. Если перемещение мало́, то давление газа можно считать постоянным.

Работа газа равна

$$A' = F'\Delta h = pS(h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1). \qquad (5.1.1)$$

Эту работу можно выразить через изменение объёма газа. Начальный объём $V_1 = Sh_1$, а конечный $V_2 = Sh_2$. Поэтому

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V, \qquad (5.1.2)$$

где $\Delta V = V_2 - V_1$ — изменение объёма газа.

При расширении газ совершает положительную работу, так как направления силы и перемещения поршня совпадают.

Если газ сжимается, то формула (5.1.2) для работы газа остаётся справедливой. Но теперь $V_2 < V_1$, и поэтому $A' < 0$ (рис. 5.2).

Работа A, совершаемая внешними телами над газом, отличается от работы газа A' только знаком: $A = -A'$, так как сила $\vec{F}$, действующая на газ, направлена против силы $\vec{F}'$, а перемещение остаётся тем же самым. Поэтому работа внешних сил, действующих на газ, равна

$$A = -A' = -p\Delta V. \qquad (5.1.3)$$

Знак «минус» указывает, что при сжатии газа, когда $\Delta V = V_2 - V_1 < 0$, работа внешней силы положительна. Понятно,

почему в этом случае $A > 0$: при сжатии газа направления силы и перемещения совпадают. При расширении газа, наоборот, работа внешних тел отрицательна ($A < 0$), так как $\Delta V = V_2 - V_1 > 0$. Теперь направления силы и перемещения противоположны.

Выражения (5.1.2) и (5.1.3) справедливы не только при сжатии или расширении газа в цилиндре, но и при малом изменении объёма любой системы. Если процесс изобарный ($p = \text{const}$), то эти формулы можно применять и для больших изменений объёма.

Геометрическое истолкование работы

Работе газа A' для случая постоянного давления можно дать простое геометрическое истолкование.

Построим график зависимости давления газа от объёма (рис. 5.3). Здесь площадь прямоугольника $abcd$, ограниченная графиком $p_1 = \text{const}$, осью V и отрезками ab и cd, равными давлению газа, численно равна работе (5.1.2).

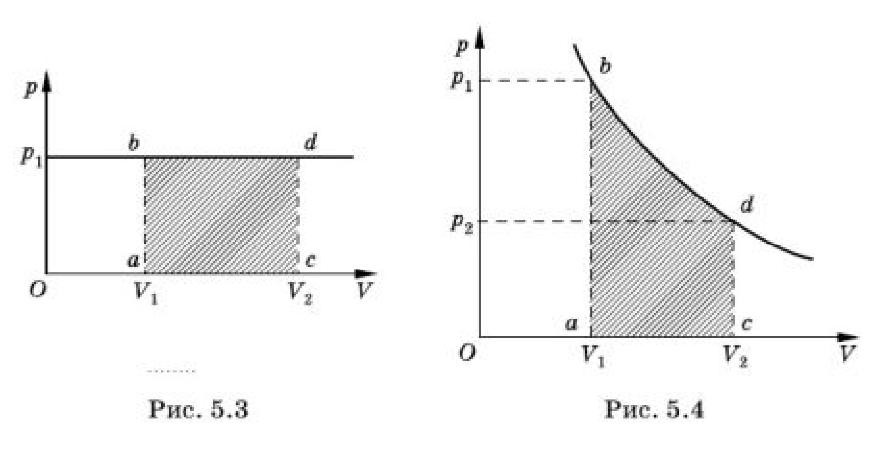


Рис. 5.3 Рис. 5.4

В общем случае при произвольном изменении объёма газа давление не остаётся неизменным. Например, при изотермическом процессе оно убывает обратно пропорционально объёму (рис. 5.4). В этом случае для вычисления работы нужно общее изменение объёма разделить на малые части, вычислить элементарные (малые) работы, а потом все их сложить. Работа газа по-прежнему будет численно равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости p от V, осью V и отрезками ab и cd, равными давлениям p_1 и p_2 в начальном и конечном состояниях.

Работа внешней силы, изменяющей объём газа на ΔV, равна $A = -p\Delta V$. Работа самого газа $A' = -A = p\Delta V$, где p — давление газа.

? **1.** Дайте определение понятия «механическая работа».

2. Как вычислить работу, совершаемую газом?

3. Поясните геометрический способ определения работы, совершаемой газом.

4. Может ли работа в термодинамике принимать отрицательные значения? При каких условиях?

§ 5.2. КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ

При совершении работы происходит перемещение макроскопических тел, например перемещение поршня при сжатии газа, рассмотренном в предыдущем параграфе. При таком перемещении изменяется состояние газа. Но изменить состояние тела можно без совершения работы, простым нагреванием.

Состояние газа в цилиндре будет меняться, если поршень закрепить и нагревать газ при помощи горелки (рис. 5.5). Объём газа при этом не меняется, но температура и давление увеличиваются. В таких случаях говорят, что системе передано некоторое количество теплоты. Это есть второй способ изменения состояния тел.

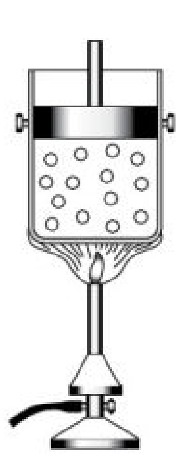


Рис. 5.5

Термин «количество переданной теплоты», или, короче, «количество теплоты», возник в те времена, когда тепло рассматривалось как неуничтожимая жидкость — теплород, способная перетекать от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой. Считалось, что чем больше в теле теплорода, тем выше его температура, а количество теплоты, переданной телу, понимали как количество перетёкшего к нему теплорода.

В действительности, как мы теперь хорошо знаем, никакой неуничтожимой жидкости — теплорода — не существует. Нагревание тела означает увеличение скоростей его молекул. При взаимодействии медленных молекул холодной системы с более быстрыми молекулами горячей на границе

систем происходит выравнивание кинетических энергий молекул. В результате скорости молекул холодной системы увеличиваются, а горячей — уменьшаются.

Калориметрические опыты

Подобно тому как изобретение термометра позволило дать определение температуры, понятие количества теплоты приобрело точный смысл после изобретения калориметра — прибора, в котором можно наблюдать теплообмен между телами, изолированными от взаимодействия с окружающей средой.

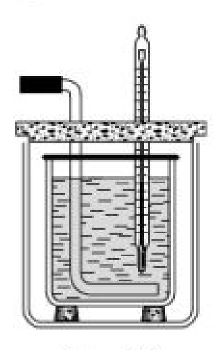


Рис. 5.6

Возьмём большой тонкостенный металлический сосуд, имеющий форму стакана. Этот стакан поставим на кусочки пробки внутрь другого, большего стакана так, чтобы между стаканами оставался слой воздуха. Сверху закроем оба сосуда крышкой (рис. 5.6). Это несложное устройство и представляет собой калориметр. Он сконструирован так, чтобы максимально уменьшить теплообмен содержимого внутреннего стакана с внешней средой.

Нальём в калориметр воду, масса которой m_1 и температура t_1, а затем добавим в него воды массой m_2 и температурой t_2. Пусть $t_2 > t_1$. В сосуде начнётся теплообмен, и спустя некоторое время установится состояние теплового равновесия — обе порции воды примут одинаковую температуру t. Очевидно, $t_1 < t < t_2$.

Изменение состояния обеих порций воды можно отнести за счёт того, что первая порция получила некоторое количество теплоты, а вторая — его отдала. Часть теплоты будет передана стенкам самого калориметра. Но если его масса во много раз меньше масс m_1 и m_2, то можно пренебречь нагревом сосуда, не допустив при этом большой ошибки.

Как видите, опыт крайне прост. Но понадобилось немало остроумия и настойчивости, чтобы с помощью этого и подобных ему опытов обнаружить сохранение новой, неизвестной ранее величины. Прежде всего было замечено, что для данных масс воды m_1 и m_2 при любых значениях начальных температур t_1 и t_2 выполняется замечательное по своей простоте равенство:

$$\frac{t - t_1}{t_2 - t} = \frac{m_2}{m_1}. \qquad (5.2.1)$$

Причём заметьте, никто не знал, что должна существовать какая-либо простая связь между изменениями температур и массами. В нахождении подобных простых связей и заключается одна из сторон таланта учёного. Располагая калориметром, вы сами легко можете убедиться в справедливости равенства (5.2.1). Существенно, что формула (5.2.1) выполняется не только для воды, но и для любой жидкости.

Теперь усложним опыт. Вместо второй порции воды опустим в калориметр кусок железа массой m_2, температура которого $t_2 > t_1$. С течением времени опять установится равновесное состояние. Но связь между температурами и массами будет иной. В правой части выражения (5.2.1) появится коэффициент k:

$$\frac{t - t_1}{t_2 - t} = k\frac{m_2}{m_1}. \qquad (5.2.2)$$

Этот коэффициент можно определить, измерив t и зная t_1, t_2, m_1 и m_2. Его значение остаётся неизменным при любых массах и начальных температурах веществ. Но если взять вместо железа алюминий или вместо воды масло, то значение этого коэффициента будет другим. Отсюда можно сделать вывод, что конечная температура в калориметре зависит не только от масс m_1 и m_2 веществ, но ещё от специфических тепловых свойств самих веществ. Эту зависимость и характеризует коэффициент k.

Так как для одинаковых веществ $k = 1$, то этот коэффициент можно записать в виде отношения величин c_2 и c_1, характеризующих тепловые свойства веществ (например, железа и воды). Наряду с отношением масс $\frac{m_2}{m_1}$ в правой части равенства (5.2.2) должно стоять отношение $\frac{c_2}{c_1} = k$.

Количество теплоты. Уравнение теплового баланса

Обозначим изменение температуры воды через $\Delta t_1 = t - t_1$, а изменение температуры железа через $\Delta t_2 = t - t_2$ ($\Delta t_2 < 0$, если $t_2 > t_1$). Тогда уравнение (5.2.2) можно записать в форме

$$\frac{\Delta t_1}{-\Delta t_2} = \frac{c_2 m_2}{c_1 m_1},$$

или

$$c_1 m_1 \Delta t_1 + c_2 m_2 \Delta t_2 = 0. \qquad (5.2.3)$$

Равенство (5.2.3) имеет характер закона сохранения. Сумма двух величин, одна из которых относится к первому телу, а другая — ко второму, всегда равна нулю независимо от масс тел, их температур и выбора пар тел. Воду и железо мы ведь выбрали произвольно.

Назовём $Q_1 = c_1 m_1 \Delta t_1$ количеством теплоты, полученным водой, а $Q_2 = c_2 m_2 \Delta t_2$ — количеством теплоты, отданным железом. Тогда можно утверждать, что количество теплоты в калориметрических опытах сохраняется:

$$Q_1 + Q_2 = 0. \tag{5.2.4}$$

В равенстве (5.2.4) $Q_1 > 0$, так как $\Delta t_1 > 0$ (вода нагрелась от температуры t_1 до температуры $t > t_1$). Второе же слагаемое Q_2 отрицательно ($Q_2 < 0$), так как $\Delta t_2 < 0$.

Таким образом, полученное телом количество теплоты положительно, а отданное — отрицательно.

Количество теплоты, отданное одним телом, равно по модулю количеству теплоты, полученному другим телом. Уравнение (5.2.4) называется *уравнением теплового баланса*.

Итак, мы ввели новую величину — количество теплоты:

$$\boxed{Q = cm\Delta t.} \tag{5.2.5}$$

В общем случае теплообмен осуществляется между многими телами, и уравнение теплового баланса запишется так:

$$\boxed{Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots + Q_n = 0.} \tag{5.2.6}$$

Здесь Q_1, Q_2, Q_3, ..., Q_n — количества теплоты, полученные или отданные телами.

Теплоёмкость

Выясним физический смысл величины c. Если масса тела равна единице и температура меняется на единицу, то согласно формуле (5.2.5) величина c численно равна количеству теплоты. Таким образом, **постоянная c численно равна количеству теплоты, которое нужно сообщить единице массы вещества, чтобы изменить его температуру на 1 °С.** Эту величину называют *удельной теплоёмкостью вещества*. Она характеризует тепловые свойства веще-

ства. Количество теплоты, необходимое для увеличения температуры на 1 °С у тела произвольной массы, называют **теплоёмкостью данного тела**. Теплоёмкость одного моля вещества называют **молярной теплоёмкостью**.

В опытах по наблюдению теплообмена между телами, как мы видели, количество теплоты сохраняется. Именно на основе этого факта возникла теория теплорода, в которой тепло рассматривалось как неуничтожимая, невесомая жидкость. С точки зрения теории теплорода теплоёмкость аналогична обычной ёмкости сосуда. Подобно тому как при переливании в сосуд некоторого количества жидкости уровень её в сосуде повышается тем больше, чем меньше его поперечное сечение (его ёмкость), так сообщение телу данного количества теплоты тем больше увеличит его температуру, чем меньше теплоёмкость тела.

Для измерения переданного количества теплоты была введена специальная единица — **калория**. *Под калорией понималось количество теплоты, которое нужно сообщить* 1 г *воды, чтобы увеличить его температуру на* 1 °С. Таким образом, удельную теплоёмкость воды по определению принимали равной 1 кал/(г · °С).

Калориметрические опыты позволяют определить удельную теплоёмкость любого вещества. Для этого нужно проследить за теплообменом исследуемого вещества с водой, удельная теплоёмкость которой c принята за единицу. Из уравнения (5.2.3) следует:

$$c_2 = -\frac{c_1 m_1 (t - t_1)}{m_2 (t - t_2)}. \qquad (5.2.7)$$

Впоследствии (см. следующий параграф) прямыми опытами было доказано, что количество теплоты сохраняется только при определённых условиях. Открытие этого факта привело к гибели теорию теплорода. Но созданная во времена её господства терминология, относящаяся к тепловым процессам, осталась.

Нагревание или охлаждение тела связано с передачей количества теплоты $Q = cm\Delta t$. При калориметрических опытах количество теплоты сохраняется.

? **1.** Дайте определение понятия «количество теплоты». Почему не существует понятия «количество работы»?

2. Запишите уравнение теплового баланса в общем случае теплообмена между несколькими телами.
3. Что называют теплоёмкостью тела; удельной теплоёмкостью; молярной теплоёмкостью? Какое из этих понятий более общее?

§ 5.3. ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ И РАБОТЫ

Исторический процесс изучения тепловых явлений, приведший к формулировке закона сохранения энергии, был длительным и трудным. До середины XIX в. развитие механики и теории тепловых явлений шло в основном независимо. Различны были методы исследования механических и тепловых явлений, способы измерения и единицы таких величин, как работа и количество теплоты.
Огромный прогресс в представлениях о природе теплоты был достигнут тогда, когда было доказано, что при теплообмене сохраняется энергия, а не особое вещество — теплород.

Нагревание тела, как показали эксперименты, может происходить без сообщения ему какого-либо количества теплоты, а только за счёт совершения работы. Убедиться в этом нетрудно. Возьмите обыкновенную резинку и энергично потрите ею о стол. Приложив после этого резинку к щеке, вы обнаружите, что она нагрелась.

В больших масштабах наблюдал подобное явление ещё в 1798 г. Б. Румфорд. При сверлении пушечного ствола, которое производили с помощью лошадей, вращавших большое тупое сверло, Румфорд успевал вскипятить поставленный на ствол котёл с водой. Румфорд предположил, что вода нагревается в процессе совершаемой при сверлении работы.

Известно, что без смазки, уменьшающей трение, работа сил трения приводит к такому нагреванию, что плавятся подшипники (например, у коленчатого вала автомобиля). В современных быстрорежущих сверлильных и токарных станках нагрев свёрл и резцов настолько велик, что для их охлаждения применяют специальные жидкости.

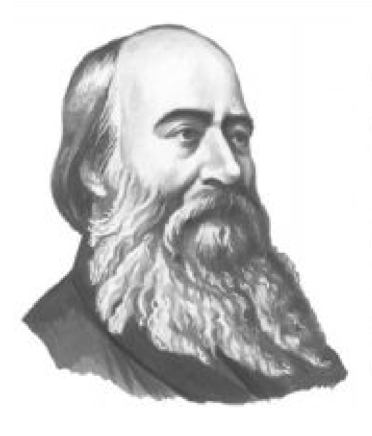
С помощью трения сухих кусочков дерева можно добыть огонь, т. е. нагреть дерево до температуры, превышающей температуру его воспламенения. Это умело использовали первобытные люди.

Перечисленные выше и подобные им многочисленные опыты показали, что количество теплоты сохраняется только при теплообмене, когда не совершается работа. Количество теплоты не является неуничтожимой и несотворимой жидкостью, оно представляет собой величину, родственную работе. Одинаковое повышение температуры тела может быть вызвано как передачей некоторого количества теплоты Q, так и совершением определённой работы A. Но работа в механике равна изменению энергии системы. Поэтому *количество теплоты, как и работу, надо считать мерой изменения энергии системы и выражать её в тех же единицах, что и работу, т. е. в джоулях.*

Опыты Джоуля

Первые точные опыты, доказывающие эквивалентность количества теплоты, переданного телу, и работы, были выполнены английским ученым Д. Джоулем в середине XIX в.

Интерес к проблеме впервые возник у Джоуля из знакомства с электрическими двигателями, которые только что были изобретены. Джоуль был человеком весьма практического склада ума, и его увлекла идея создать вечный источник энергии. Он изготовил вольтову батарею, запустил от неё примитивный электродвигатель собственной конструкции и увидел, что получить нечто из ничего не удаётся: цинк в батарее съедался и замена его обходилась довольно дорого. (Позже Джоуль доказал, к своему собственному удовольствию, что прокормить лошадь всегда дешевле, чем менять цинк в батареях, так что лошадь никогда не будет вытеснена электродвигателем.) Это побудило Джоуля исследовать связь



Джоуль Джеймс Прескотт (1818—1889) — выдающийся английский физик, один из первооткрывателей закона сохранения энергии. Джоуль первым осуществил очень точные измерения механического эквивалента теплоты. Наряду с Э. Х. Ленцем установил закон для определения количества теплоты, выделяемой электрическим током (закон Джоуля—Ленца).

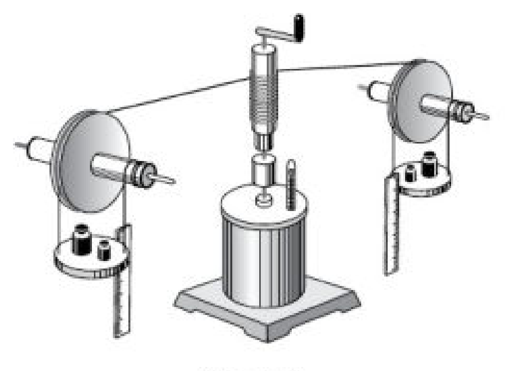


Рис. 5.7

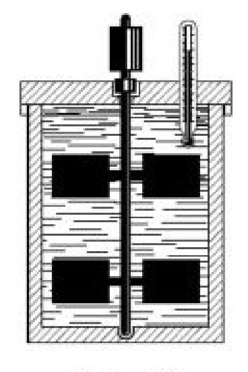


Рис. 5.8

между теплотой и энергией всех видов, и он решил выяснить, существует ли точное количественное соотношение между теплотой и механической энергией.

Джоуль провёл много различных экспериментов. В одном из них он измерял увеличение температуры ртути в калориметре при вращении лопастей, которые приводились в движение опускающимися грузами (рис. 5.7). В начале и конце опыта грузы, лопасти и ртуть в калориметре (рис. 5.8) находились в покое, так что их кинетическая энергия за время опыта не менялась. Зная работу, совершаемую грузами при движении*, и измеряя увеличение температуры при трении лопастей о ртуть, Джоуль пришёл к следующему результату: при совершении работы 4,2 Дж происходит такое же повышение температуры, как и при сообщении телу количества теплоты, равного 1 кал.

Механический эквивалент теплоты

Многочисленные последующие опыты самого Джоуля и других учёных подтвердили сделанный вывод. Было экспериментально доказано, что калория есть не что иное, как тепловая единица энергии. Величина 4,2 Дж/кал (или, точнее, 4,1868 Дж/кал) получила название *механического эквивалента теплоты*: это переводной множитель из тепловых единиц в механические**.

---

* Эта работа в условиях опыта Джоуля равнялась изменению потенциальной энергии грузов при движении их вниз.

** Д. Джоуль получил значение 4,155 Дж/кал. Столетний опыт усовершенствования техники измерений улучшил результат Джоуля менее чем на 1%. Измерения Джоуля были выполнены с завидной точностью.

В СИ количество теплоты выражают в джоулях, а удельную теплоёмкость — в джоулях на килограмм-кельвин. Для воды удельная теплоёмкость примерно равна 4190 Дж/(кг • К).

Количество переданной теплоты оказалось эквивалентным работе: механический эквивалент теплоты 4,2 Дж/кал.

? 1. Перечислите способы изменения внутренней энергии тела.
2. Опишите опыты Джоуля. Какой вклад результаты этих исследований внесли в развитие термодинамики?
3. Поясните смысл понятия «механический эквивалент теплоты».
4.° Почему в диетологии энергетическую ценность продуктов принято обозначать в калориях, а не в джоулях?

§ 5.4. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

На основании опытов Джоуля и бесчисленного множества других наблюдений, путём обобщения опытных фактов был сформулирован один из наиболее фундаментальных законов физики — закон сохранения энергии.

Закон сохранения энергии

Опыты Джоуля и других учёных убедительно доказали, что механическая энергия никогда не пропадает бесследно. Опускаются гири, вращающие лопасти в сосуде с ртутью, и температура ртути повышается на строго определённое число градусов. Падает молот на кусок свинца, и свинец нагревается вполне определённым образом.

Был сделан вывод: **энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает: количество энергии неизменно. Она только переходит из одной формы в другую.**

Закон сохранения энергии управляет всеми явлениями в природе и связывает их воедино. Он выполняется всегда: не известно ни одного случая, когда бы он был нарушен.

Если в механике закон сохранения был получен из законов Ньютона, то общий закон сохранения энергии, включающий все её формы, является опытным (эмпирическим) законом. Он был открыт в середине XIX в. немецким учёным

Р. Майером*, английским учёным Д. Джоулем и получил наиболее полную формулировку в трудах немецкого учёного Г. Гельмгольца.

Внутренняя энергия

Все макроскопические тела наряду с механической энергией обладают ещё энергией, зависящей от внутреннего состояния тел. Эту энергию называют внутренней. Открытие закона сохранения энергии оказалось возможным лишь после того, как было доказано существование внутренней энергии.

При нагревании ртути в опытах Джоуля её внутренняя энергия увеличивалась за счёт уменьшения механической энергии опускающихся гирь. При работе паровой турбины, наоборот, механическая энергия появляется в результате уменьшения внутренней энергии пара.

Наблюдать превращение внутренней энергии в механическую можно на простом опыте. Если нагревать воду в пробирке, то внутренняя энергия воды начнёт возрастать. Вода



Майер Юлиус Роберт (1814—1878) — немецкий врач и замечательный физик. Майер фактически впервые чётко сформулировал закон сохранения энергии и вычислил механический эквивалент теплоты на основе сравнения теплоёмкостей газов при постоянном давлении и постоянном объёме. Идеи Майера не сразу были поняты и признаны современниками, а в дальнейшем оспаривался приоритет его открытия. Это нанесло ему тяжёлую психологическую травму.

---

* Во время пребывания в тропиках (остров Ява) в качестве судового врача Майер при эпидемии лёгочных заболеваний лечил моряков обычным в то время методом: обильным кровопусканием из вены руки. Он обратил внимание на то, что цвет венозной крови значительно светлее, чем при плавании в северных широтах. Её можно спутать с артериальной. Между разностью температур тела и окружающей среды и степенью окисления крови существовала очевидная связь. Отсюда Майер сделал вывод о связи между потреблением пищи и образованием теплоты в организме.

закипит, и давление пара увеличится настолько, что пробка будет выбита. Кинетическая энергия пробки увеличилась за счёт внутренней энергии пара. Расширяясь, водяной пар совершает работу и охлаждается. Его внутренняя энергия при этом уменьшается.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории **внутренняя энергия макроскопического тела равна сумме кинетических энергий хаотического движения всех молекул (или атомов) относительно центра масс тела* и потенциальных энергий взаимодействия всех молекул друг с другом** (но не с молекулами других тел). Кроме того, во внутреннюю энергию входит энергия движения и взаимодействия частиц, слагающих атомы и молекулы. Но при не слишком больших температурах эта энергия остаётся неизменной.

У идеального газа вся внутренняя энергия представляет собой кинетическую энергию теплового движения его молекул (см. § 4.8).



Гельмгольц Герман Людвиг Фердинанд (1821—1894) — выдающийся немецкий физик, математик и физиолог. В 1847 г. в работе «О сохранении силы» Гельмгольц впервые математически обосновал закон сохранения энергии. Проанализировав большинство известных в то время физических явлений, он показал его всеобщность. Широко известны труды Гельмгольца по термодинамике, электродинамике, гидродинамике и физиологической акустике. Он впервые указал на колебательный характер разряда лейденской банки (конденсатора), по его предложению Г. Герц произвёл опыты по обнаружению электромагнитных волн. Гельмгольц первым измерил скорость распространения импульса возбуждения в нервах, построил модель уха и развил теорию цветового зрения.

* Кинетическая энергия молекул при упорядоченном перемещении их вместе с телом представляет собой механическую кинетическую энергию тела.

Зависимость внутренней энергии от макроскопических параметров

Вычислить внутреннюю энергию тела или её изменение, учитывая движение отдельных молекул и их положение друг относительно друга, практически невозможно из-за огромного числа молекул в макроскопических телах. Необходимо поэтому уметь определять среднее значение внутренней энергии и её изменение в зависимости от макроскопических параметров, которые можно непосредственно измерять.

Мы установили, что внутренняя энергия идеального газа зависит от одного параметра — температуры. От объёма внутренняя энергия идеального газа не зависит потому, что потенциальная энергия взаимодействия его молекул считается равной нулю.

У реальных газов, жидкостей и твёрдых тел средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул не равна нулю. Правда, для реальных газов она много меньше средней кинетической энергии, но для твёрдых и жидких тел сравнима с кинетической. Средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул зависит от объёма вещества, так как при изменении объёма меняется среднее расстояние между молекулами. Следовательно, внутренняя энергия в общем случае наряду с температурой T зависит ещё и от объёма V.

Так как значения макроскопических параметров T, V и других однозначно определяют состояние тел, то, следовательно, они определяют и внутреннюю энергию макроскопических тел.

Внутренняя энергия U макроскопических тел однозначно определяется параметрами, характеризующими состояния этих тел:

$$U = U(T, V).$$

Но обратное несправедливо. Одной и той же внутренней энергии могут соответствовать различные состояния. Так, после того как в калориметр с водой положен нагретый кусок железа, состояние системы «вода — железо» изменится: вода нагреется, а железо остынет. Однако внутренняя энергия всей системы не изменится, так как энергия не поступает извне от окружающих тел и не передаётся им.

Макроскопические тела наряду с механической энергией обладают внутренней энергией. В термодинамике внутренняя энергия определяется макроскопическими параметрами T, V и др.

? 1. Сформулируйте закон сохранения механической энергии, закон сохранения энергии. Почему закон сохранения энергии является эмпирическим законом? Каким образом был получен закон сохранения механической энергии?
2. Какова роль внутренней энергии в открытии закона сохранения энергии?
3. Поясните молекулярно-кинетический смысл внутренней энергии макроскопического тела. От каких макроскопических параметров зависит внутренняя энергия тела?

§ 5.5. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики — это закон сохранения энергии, распространённый на тепловые явления. Он показывает, от каких причин зависит изменение внутренней энергии. Этот великий закон прост.

Первый закон термодинамики

В механике было доказано, что если между телами действуют силы, зависящие только от расстояния, то при переходе системы тел из начального состояния *1* в конечное *2* изменение энергии равно работе внешних сил

$$\Delta E = E_2 - E_1 = A. \qquad (5.5.1)$$

Энергия E — однозначная функция состояния системы; она зависит от скоростей тел и их расположения.

После того как мы выяснили, что наряду с механической энергией тела́ обладают ещё и внутренней энергией, которая может меняться не только при совершении работы, но и при теплопередаче, закон сохранения (5.5.1) можно обобщить на тепловые процессы.

Изменение полной энергии (механической E и внутренней U) при переходе системы из начального состояния *1* в конечное *2* равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:

$$(E_2 + U_2) - (E_1 + U_1) = A + Q. \qquad (5.5.2)$$

В теории тепловых явлений обычно рассматривают тела, положение центра масс которых изменяется незначительно. В этом случае механическая энергия практически не меняется: $E_2 = E_1$.

Считая механическую энергию неизменной, мы можем первый закон термодинамики сформулировать следующим образом:

Изменение внутренней энергии системы при переходе её из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:

$$\boxed{\Delta U = A + Q} \qquad (5.5.3)$$

и не зависит от способа, которым осуществляется этот переход.

Первый закон термодинамики связывает изменение внутренней энергии с изменением макроскопических параметров V и T, так как через изменение этих параметров выражается работа и количество теплоты. Внутренняя энергия определяется первым законом с точностью до произвольной постоянной, так как уравнение (5.5.3) позволяет определить изменение внутренней энергии, но не саму энергию.

Часто вместо работы A внешних тел над системой рассматривают работу A' системы над внешними телами. Учитывая, что $A' = -A$ (см. § 5.1), первый закон термодинамики в форме (5.5.3) можно переписать так:

$$Q = \Delta U + A'. \qquad (5.5.4)$$

Количество теплоты, переданное системе, идёт на изменение её внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

Суть первого закона термодинамики

Самое пристальное внимание надо обратить на следующее. Сама формула (5.5.3) — это ещё не закон природы (не первый закон термодинамики); это лишь определение того, что понимается под внутренней энергией (точнее, под изменением внутренней энергии). Вычислять мы можем работу и количество теплоты соответственно по формулам (5.1.3) и (5.2.5), но не непосредственно внутреннюю энергию. Суть закона в утверждении: **изменение внутренней энергии не зависит от процесса и определяется только начальным и конечным состояниями системы.** Это означает, что внутренняя энергия — однозначная функция состояния системы (с точностью до произвольной постоянной) и в замкнутой системе сохраняется.

Невозможность создания вечного двигателя

Задолго до открытия закона сохранения энергии Французская академия наук приняла в 1775 г. решение не рассматривать проектов вечных двигателей первого рода (от

лат. perpetuum mobile — вечно движущееся). Впоследствии подобные решения были приняты ведущими научными учреждениями других стран.

Под вечным двигателем первого рода понимают устройство, которое могло бы совершать неограниченное количество работы без затраты топлива или каких-либо других материалов. Теперь можно сказать — без затраты энергии.

Проектов такого рода двигателей было создано великое множество. Продолжают их придумывать несведущие люди и сейчас. Многие из этих проектов были остроумны, и далеко не сразу можно сказать, что же конкретно мешает работать предлагаемым устройствам. (Убедиться в этом вы можете, попробовав решить задачу 12 из упражнения 4.) Но все они обладали и обладают общим свойством: не действуют вечно. Именно это и привело учёных всего мира к уверенности, что дело здесь не в несовершенстве отдельных конструкций, а в некой общей закономерности природы.

Согласно первому закону термодинамики, если к системе не поступает теплота ($Q = 0$), то работа A' в соответствии с уравнением (5.5.4) может быть совершена только за счёт убыли внутренней энергии: $A' = -\Delta U$. После того как запас энергии окажется исчерпанным, двигатель перестанет работать.

В случае изолированной системы над ней не совершается работа ($A = 0$), и она не обменивается теплотой с окружающими телами ($Q = 0$). Согласно первому закону термодинамики в этом случае $\Delta U = U_2 - U_1 = 0$, или $U_1 = U_2$. *Внутренняя энергия изолированной системы остаётся неизменной* (*сохраняется*).

Работа и количество теплоты — характеристики процесса изменения энергии

В данном состоянии система всегда обладает определённой внутренней энергией. Но *нельзя говорить, что в системе содержится определённое количество теплоты или работы. Как работа, так и количество теплоты являются величинами, характеризующими изменение энергии системы в результате того или иного процесса.*

Внутренняя энергия системы может измениться одинаково как за счёт совершения системой работы, так и за счёт передачи окружающим телам какого-то количества теплоты. Например, нагретый газ в цилиндре может уменьшить свою энергию остывая, без совершения работы. Но он может поте-

рять точно такую же энергию, перемещая поршень, без отдачи теплоты окружающим телам. Для этого стенки цилиндра и поршень должны быть теплонепроницаемыми.

В дальнейшем на протяжении всего курса физики мы будем знакомиться с различными другими формами энергии, способами их превращения и передачи.

Существует однозначная функция состояния — внутренняя энергия. Её изменение определяется начальным и конечным состояниями системы и не зависит от способа, каким осуществляется переход из одного состояния в другое.

? **1.** Сформулируйте первый закон термодинамики. Поясните его физический смысл.

2. Возможен ли процесс, в котором сообщение системе некоторого количества теплоты не приводит к повышению её температуры?

3. Покажите, что из первого закона термодинамики следует невозможность вечного двигателя первого рода.

4. Почему работа и количество теплоты не являются функциями состояния?

§ 5.6. ТЕПЛОЁМКОСТИ ГАЗА ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЁМЕ И ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

При введении понятия теплоёмкости мы не обращали внимание на одно существенное обстоятельство: теплоёмкости зависят не только от свойств вещества, но и от процесса, при котором осуществляется теплопередача.

Если нагревать тело при постоянном давлении, то оно будет расширяться и совершать работу. Для нагревания тела на 1 К при постоянном давлении ему нужно передать большее количество теплоты, чем при таком же нагревании при постоянном объёме.

Жидкие и твёрдые тела расширяются при нагревании незначительно, и их теплоёмкости при постоянном объёме и постоянном давлении мало различаются. Но для газов это различие существенно. С помощью первого закона термодинамики можно найти связь между теплоёмкостями газа при постоянном объёме и постоянном давлении.

Теплоёмкость газа при постоянном объёме

Найдём молярную теплоёмкость газа при постоянном объёме. Согласно определению теплоёмкости

$$C = \frac{Q}{\Delta T},$$

где ΔT — изменение температуры. Если процесс происходит при постоянном объёме, то эту теплоёмкость обозначим через C_V. Тогда

$$Q_V = C_V \Delta T. \qquad (5.6.1)$$

При постоянном объёме работа не совершается. Поэтому первый закон термодинамики запишется так:

$$C_V \Delta T = \Delta U. \qquad (5.6.2)$$

Изменение энергии одного моля достаточно разреженного (идеального) одноатомного газа равно $\Delta U = \frac{3}{2} R \Delta T$ (см. § 4.8). Следовательно, молярная теплоёмкость при постоянном объёме одноатомного газа равна

$$C_V = R. \qquad (5.6.3)$$

Теплоёмкость газа при постоянном давлении

Согласно определению теплоёмкости при постоянном давлении C_p

$$Q_p = C_p \Delta T. \qquad (5.6.4)$$

Работа, которую совершит 1 моль идеального газа, расширяющегося при постоянном давлении, равна

$$A' = R \Delta T^*. \qquad (5.6.5)$$

Это следует из выражения для работы газа при постоянном давлении $A' = p\Delta V$ и уравнения состояния (для одного моля) идеального газа $pV = RT$.

Внутренняя энергия идеального газа от объёма не зависит. Поэтому и при постоянном давлении изменение внутренней энергии $\Delta U = C_V \Delta T$, как и при постоянном объёме. Применяя первый закон термодинамики, получим

$$C_p \Delta T = C_V \Delta T + R \Delta T. \qquad (5.6.6)$$

---

* Из формулы (5.6.5) видно, что универсальная газовая постоянная численно равна работе, которую совершает 1 моль идеального газа при постоянном давлении, если температура его увеличивается на 1 К.

Следовательно, молярные теплоёмкости идеального газа связаны соотношением

$$C_p = C_V + R. \quad (5.6.7)$$

Впервые эта формула была получена Р. Майером и носит его имя.

В случае идеального одноатомного газа

$$C_p = \frac{3}{2}R + R = \frac{5}{2}R. \quad (5.6.8)$$

Теплоёмкость идеального газа при изотермическом процессе

Можно формально ввести понятие теплоёмкости и при изотермическом процессе. Так как при этом процессе внутренняя энергия идеального газа не меняется, какое бы количество теплоты ему ни было передано, то теплоёмкость бесконечна.

Молярная теплоёмкость идеального газа при постоянном давлении больше теплоёмкости при постоянном объёме на величину универсальной газовой постоянной R.

? 1. Рассчитайте теплоёмкость газа при постоянном объёме, постоянном давлении.
2. Почему молярная теплоёмкость при изобарном процессе больше молярной теплоёмкости при изохорном процессе?
3. При каком изопроцессе теплоёмкость бесконечна?

§ 5.7. АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС

Мы рассмотрели изотермический, изобарный и изохорный процессы. После ознакомления с первым законом термодинамики появляется возможность изучить ещё один процесс — это процесс, протекающий в системе при отсутствии теплообмена с окружающими телами. (Но работу над окружающими телами система может совершать.)

Процесс в теплоизолированной системе называют адиабатным.

При адиабатном процессе $Q = 0$ и согласно закону (5.5.3) изменение внутренней энергии происходит только за счёт совершения работы:

$$\Delta U = A. \tag{5.7.1}$$

Конечно, нельзя окружить систему оболочкой, абсолютно исключающей теплообмен. Но в ряде случаев реальные процессы очень близки к адиабатным. Существуют оболочки, обладающие малой теплопроводностью, например двойные стенки с вакуумом между ними. Так изготовляются термосы.

Процесс можно считать адиабатным даже без теплоизолирующей оболочки, если он происходит достаточно быстро, т. е. так, чтобы за время процесса не происходило заметного теплообмена между системой и окружающими телами.

Согласно выражению (5.7.1) при совершении над системой положительной работы, например при сжатии газа, внутренняя энергия его увеличивается; газ нагревается. Наоборот, при расширении газ сам совершает положительную работу ($A' > 0$), но $A < 0$ и внутренняя энергия его уменьшается; газ охлаждается.

Зависимость давления газа от его объёма при адиабатном процессе изображается кривой, называемой а д и а б а т о й (рис. 5.9). Адиабата обязательно идёт круче изотермы. Ведь при адиабатном процессе давление газа уменьшается не только за счёт увеличения объёма, как при изотермическом процессе, но и за счёт уменьшения его температуры.

Адиабатные процессы широко используются в технике. Они играют немалую роль в природе.

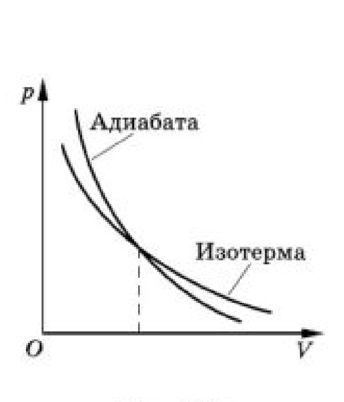


Рис. 5.9

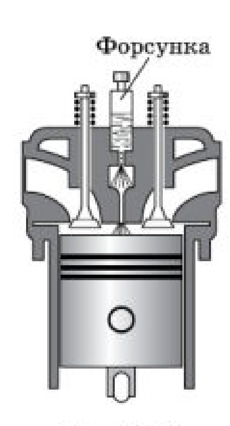


Рис. 5.10

Нагревание воздуха при быстром сжатии нашло применение в двигателях Дизеля. В этих двигателях отсутствуют системы приготовления и зажигания горючей смеси, необходимые для обычных бензиновых двигателей внутреннего сгорания. В цилиндр засасывается не горючая смесь, а атмосферный воздух. К концу такта сжатия в цилиндр с помощью специальной форсунки впрыскивается жидкое топливо (рис. 5.10). К этому моменту температура сжатого воздуха так велика, что горючее воспламеняется.

Так как в двигателе Дизеля сжимается не горючая смесь, а воздух, то степень сжатия у этого двигателя больше, а значит, коэффициент полезного действия (КПД) двигателей Дизеля выше, чем у обычных двигателей внутреннего сгорания. Кроме того, они могут работать на более дешёвом низкосортном топливе. Есть, однако, у двигателя Дизеля и недостатки: необходимость высоких степеней сжатия и большое рабочее давление делают эти двигатели массивными и вследствие этого более инерционными — они медленнее набирают мощность. Двигатели Дизеля более сложны в изготовлении и эксплуатации, тем не менее они постепенно вытесняют обычные бензиновые двигатели, используемые в автомобилях.

Охлаждение газа при адиабатном расширении происходит в грандиозных масштабах в атмосфере Земли. Нагретый воздух поднимается вверх и расширяется, так как атмосферное давление падает с высотой. Это расширение сопровождается значительным охлаждением. В результате водяные пары конденсируются и образуются облака.

Теплообмен в замкнутой системе

Если система не только не обменивается теплотой с окружающими телами, но и не совершает работы, то она является замкнутой. Внутренняя энергия системы в этом случае не меняется. Но внутри неё могут происходить процессы, в частности теплообмен между телами системы, если температуры их различны. Именно такие процессы происходят в калориметре, если можно пренебречь теплообменом содержимого калориметра с окружающими телами.

При теплообмене между телами не совершается работы. Поэтому изменение энергии любого тела внутри калориметра равно количеству теплоты, полученной или отданной этим телом до наступления теплового равновесия внутри системы: $\Delta U_i = Q_i$. Складывая подобные выражения для всех тел системы и учитывая, что суммарная внутренняя энергия

не меняется ($\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \ldots = 0$), получим уравнение

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots = 0. \qquad (5.7.2)$$

Это и есть уравнение теплового баланса, которое было получено в § 5.2. Но там оно появилось как результат обобщения опытных данных по калориметрическим экспериментам. Теперь же мы его получили в качестве одного из следствий первого закона термодинамики.

Процесс в системе можно считать адиабатным, если он протекает достаточно быстро и за это время не происходит заметного теплообмена между системой и окружающими телами. Такие процессы широко распространены в природе и используются в технике.

? 1. При каких условиях реальные процессы можно считать адиабатными?

2. Верно ли, что при адиабатном расширении газ совершит меньшую работу, чем при изотермическом (изменения объёма и начальные условия в обоих процессах одинаковы)?

§ 5.8. НЕОБРАТИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДЕ

Закон сохранения энергии утверждает, что количество энергии при любых её превращениях остаётся неизменным. Но он ничего не говорит о том, какие энергетические превращения возможны. Между тем многие процессы, вполне допустимые с точки зрения закона сохранения энергии, никогда не протекают в действительности.

Нагретые тела сами собой остывают, передавая свою энергию более холодным окружающим телам. Обратный процесс передачи теплоты от холодного тела к горячему не противоречит закону сохранения энергии, но на самом деле не происходит.

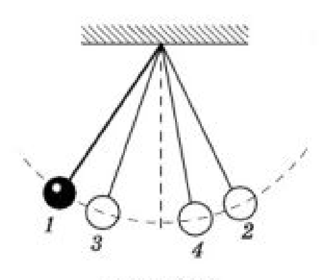


Рис. 5.11

Другой пример. Колебания маятника, выведенного из положения равновесия, затухают (рис. 5.11; *1*, *2*, *3*, *4* — последовательные положения маятника при максимальных отклонениях от положения равновесия). За счёт работы сил трения механическая энергия убывает, а тем-

пература маятника и окружающего воздуха слегка повышается. Энергетически допустим и обратный процесс, когда амплитуда колебаний маятника увеличивается за счёт охлаждения самого маятника и окружающей среды. Но такой процесс никогда не наблюдался. Механическая энергия самопроизвольно переходит во внутреннюю, но не наоборот. При этом упорядоченное движение тела как целого превращается в неупорядоченное тепловое движение слагающих его молекул.

Число подобных примеров можно увеличить практически неограниченно. Все они говорят о том, что *процессы в природе имеют определённую направленность, никак не отражённую в первом законе термодинамики. Все процессы в природе протекают только в одном определённом направлении. В обратном направлении самопроизвольно они протекать не могут.* Все процессы в природе необратимы, и самые трагические из них — старение и смерть организмов.

Уточним понятие необратимого процесса. **Необратимым процессом может быть назван такой процесс, обратный которому может протекать только как одно из звеньев более сложного процесса.** Так, в примере с маятником можно вновь увеличить амплитуду колебаний маятника, подтолкнув его рукой. Но это увеличение амплитуды возникает не само собой, а становится возможным в результате более сложного процесса, включающего толчок рукой. Можно в принципе перевести теплоту от холодного тела к горячему, но для этого нужна холодильная установка, потребляющая энергию, и т. д.

Математически необратимость механических процессов выражается в том, что уравнения движения макроскопических тел изменяются с изменением знака времени. Они, как говорят, не инвариантны при преобразовании $t \to -t$. Ускорение не меняет знака при $t \to -t$. Силы, зависящие от расстояний, также не меняют знака. Знак при замене t на $-t$ меняется у скорости. Именно поэтому при совершении работы силами трения, зависящими от скорости, кинетическая энергия тела необратимо переходит во внутреннюю.

Хорошей иллюстрацией необратимости явлений в природе служит просмотр кинофильма в обратном направлении. Например, падение хрустальной вазы со стола будет выглядеть следующим образом. Лежащие на полу осколки вазы устремляются друг к другу и, соединяясь, образуют целую вазу. Затем ваза возносится вверх и вот уже спокойно стоит на столе. То, что мы видим на экране, могло бы происходить в действительности, если бы процессы можно было обратить.

Нелепость происходящего проистекает из того, что мы привыкли к определённой направленности процессов и не допускаем возможности их обратного течения. А ведь такой процесс, как восстановление вазы из осколков, не противоречит ни закону сохранения энергии, ни законам механики, ни вообще каким-либо законам, кроме второго закона термодинамики, который мы сформулируем в следующем параграфе.

Процессы в природе необратимы. Наиболее типичными необратимыми процессами являются:
1) переход теплоты от горячего тела к холодному;
2) переход механической энергии во внутреннюю.

? Какие процессы называют необратимыми? Приведите примеры необратимых процессов.

§ 5.9. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Второй закон термодинамики указывает направление возможных энергетических превращений и тем самым выражает необратимость процессов в природе. Он был установлен путём непосредственного обобщения опытных фактов.

Есть несколько формулировок второго закона термодинамики, которые, несмотря на внешнее различие, выражают в сущности одно и то же и поэтому равноценны. Немецкий учёный Р. Клаузиус сформулировал этот закон так:

невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии одновременных изменений в обеих системах или окружающих телах.

Здесь констатируется опытный факт определённой направленности теплопередачи: теплота сама собой переходит всегда от горячих тел к холодным. Правда, в холодильных установках осуществляется теплопередача от холодного тела к более тёплому, но эта передача связана с другими изменениями: охлаждение достигается за счёт работы.

Другая формулировка принадлежит английскому учёному У. Кельвину:

невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы получение работы за счёт теплоты, взятой от одного источника.

Здесь опять констатируются и уточняются опытные факты. Если, например, паровая машина совершает работу за счёт теплоты, полученной от парового котла, то при этом совершаемая работа не является единственным результатом процесса, так как часть теплоты обязательно уходит в атмосферу вместе с отработанным паром. То же самое относится к двигателям внутреннего сгорания и вообще ко всем тепловым двигателям. Иначе говоря, ни один тепловой двигатель не может иметь коэффициент полезного действия, равный единице. **Под коэффициентом полезного действия η теплового двигателя понимают отношение совершённой машиной работы A к количеству полученной для этой цели теплоты Q:**

$$\eta = \frac{A}{Q}. \qquad (5.9.1)$$

При адиабатном расширении газа в цилиндре работа совершается за счёт убыли внутренней энергии без передачи теплоты другим телам. Согласно формуле (5.7.1) $A' = -A = -\Delta U$. При изотермическом процессе вся передаваемая газу теплота оказывается равной работе газа: $A' = Q$.

Однако как в первом, так и во втором процессе работа совершается при однократном расширении газа до давления, равного внешнему (например, атмосферному давлению). Двигатель же должен работать длительное время. Это возможно лишь в том случае, когда все части двигателя (порш-

---



Клаузиус Рудольф Юлиус Эмануэль (1822—1888) — выдающийся немецкий физик-теоретик, один из основателей термодинамики и молекулярно-кинетической теории. Развивая идеи С. Карно, Клаузиус (одновременно с Кельвином) дал формулировку второго закона термодинамики, в которой содержалось утверждение о необратимости процесса передачи теплоты. Впервые ввёл фундаментальное понятие энтропии как меры качества внутренней энергии тела. В области молекулярно-кинетической теории Клаузиус ввёл понятие длины свободного пробега, количественно объяснил явления диффузии, теплопроводности и внутреннего трения в газах.

ни, клапаны и т. д.) совершают движения, повторяющиеся через определённые промежутки времени. Двигатель должен периодически по прошествии одного рабочего цикла возвращаться в исходное состояние, или же в двигателе должен совершаться неизменный во времени (стационарный) процесс (например, непрерывное вращение турбины).

Чтобы возвратить газ в цилиндре в исходное состояние, его необходимо сжать. Для сжатия газа надо совершить над ним работу. Работа сжатия будет меньше работы, совершаемой самим газом при расширении, если газ сжимать при меньшей температуре, а значит, и при меньшем давлении, чем это происходило при расширении газа. Для этого необходимо до сжатия или в процессе сжатия охладить газ, передав некоторое количество теплоты другим телам (холодильнику).

Если первый закон термодинамики (закон сохранения энергии) можно высказать в форме утверждения: невозможно построить вечный двигатель первого рода, — то формулировка второго закона, данная Кельвином, позволяет выразить этот закон в виде утверждения: *невозможно построить вечный двигатель второго рода*, т. е. двигатель, совершающий работу за счёт охлаждения какого-либо одного тела.

Вечный двигатель второго рода не нарушает закона сохранения энергии, но если бы он был возможен, мы располагали бы практически неограниченным источником работы, черпая её из океанов и охлаждая последние. Однако охлаждение океана, как только его температура становится ниже температуры окружающей среды, означало бы переход теплоты от тела более холодного к телу более горячему, а такой процесс сам собой идти не может. Из этого примера видно, что обе приведённые формулировки второго закона выражают одно и то же.

Направление процессов в природе указывает второй закон термодинамики.

?

1. Сформулируйте второй закон термодинамики. Почему существует несколько формулировок этого закона?
2. Какие механизмы относятся к тепловым двигателям? Приведите примеры.
3. Что понимают под коэффициентом полезного действия теплового двигателя?
4. Объясните, почему невозможно построить вечный двигатель второго рода.

§ 5.10. СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ НЕОБРАТИМОСТИ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДЕ

Второй закон термодинамики констатирует факт необратимости процессов в природе, но не даёт ему никакого объяснения. Это объяснение может быть получено только на основе молекулярно-кинетической теории, и оно является далеко не простым.

Противоречие между обратимостью микропроцессов и необратимостью макропроцессов

Необратимость макропроцессов выглядит парадоксально, потому что все микропроцессы обратимы во времени. Уравнения движения отдельных микрочастиц, как классические, так и квантовые, обратимы во времени, ибо никаких сил трения, зависящих от скорости, не содержат. Сила трения — это макроскопический эффект от взаимодействия большого тела с огромным количеством молекул окружающей среды, и появление этой силы само нуждается в объяснении. Силы, посредством которых взаимодействуют микрочастицы (в первую очередь это электромагнитные силы), по времени обратимы. Уравнения Максвелла, описывающие электромагнитные взаимодействия, не меняются при замене t на $-t$.

Если взять простейшую модель газа — совокупность упругих шариков, то газ в целом будет обнаруживать определённую направленность поведения. Например, будучи сжат в половине сосуда, он начнёт расширяться и займёт весь сосуд. Снова он не сожмётся. Уравнения же движения каждой молекулы-шарика обратимы по времени, так как содержат только силы, зависящие от расстояний и проявляющиеся при столкновении молекул.

Таким образом, задача состоит не только в объяснении происхождения необратимости, но и в согласовании факта обратимости микропроцессов с фактом необратимости макропроцессов.

Заслуга в нахождении принципиально правильного подхода к решению этой проблемы принадлежит Больцману. Правда, некоторые аспекты проблемы необратимости до сих пор не получили исчерпывающего решения.

Житейский пример необратимости

Приведём простой житейский пример, имеющий, несмотря на свою тривиальность, прямое отношение к решению проблемы необратимости Больцманом.

Допустим, с понедельника вы решили начать новую жизнь. Непременным условием этого обычно является идеальный или близкий к идеальному порядок на письменном столе. Вы расставляете все предметы и книги на строго определённые места, и у вас на столе царит состояние, которое с полным правом можно назвать состоянием «порядок».

Что произойдёт с течением времени, хорошо известно. Вы забываете ставить предметы и книги на строго определённые места, и на столе воцаряется состояние хаоса. Нетрудно понять, с чем это связано. Состоянию «порядок» отвечает только одно определённое расположение предметов, а состоянию «хаос» — несравнимо большее число. И как только предметы начнут занимать произвольные положения, не контролируемые вашей волей, на столе само собой возникает более вероятное состояние хаоса, реализуемое гораздо большим числом распределений предметов на столе.

В принципе именно такие соображения были высказаны Больцманом для объяснения необратимости макропроцессов.

Микроскопическое и макроскопическое состояния

Нужно прежде всего различать макроскопическое состояние системы и её микроскопическое состояние.

Макроскопическое состояние характеризуется немногим числом термодинамических параметров (давлением, объёмом, температурой и др.), а также такими механическими величинами, как положение центра масс, скорость центра масс и др. Именно макроскопические величины, характеризующие состояние в целом, имеют практическое значение.

Микроскопическое состояние характеризуется в общем случае заданием координат и скоростей (или импульсов) всех частиц, составляющих систему (макроскопическое тело). Это несравненно более детальная характеристика системы, знание которой совсем не требуется для описания процессов с макроскопическими телами. Более того, знание микросостояния фактически недостижимо из-за огромного числа частиц, слагающих макротела.

В приведённом выше житейском примере с предметами на столе можно ввести понятия микро- и макросостояний. Микросостоянию отвечает какое-то одно определённое расположение предметов, а макросостоянию — оценка ситуации в целом: либо «порядок», либо «хаос».

Вполне очевидно, что *определённое макросостояние может быть реализовано огромным числом различных микро-*

состояний. Так, например, переход одной молекулы из данной точки пространства в другую точку или изменение её скорости в результате столкновения изменяют микросостояние системы, но, конечно, не меняют термодинамических параметров и, следовательно, макросостояния системы.

Теперь введём гипотезу, не столь очевидную, как предшествующие утверждения: *все микроскопические состояния замкнутой системы равновероятны*; *ни одно из них не выделено, не занимает преимущественного положения*. Это предположение фактически эквивалентно гипотезе о хаотическом характере теплового движения молекул.

Вероятность состояния

С течением времени микросостояния непрерывно сменяют друг друга. Время пребывания системы в определённом макроскопическом состоянии пропорционально, очевидно, числу микросостояний Z_1, которые реализуют данное состояние. Если через Z обозначить полное число микросостояний системы, то вероятность состояния W определится так:

$$W = \frac{Z_1}{Z}. \qquad (5.10.1)$$

Вероятность макроскопического состояния равна отношению числа микросостояний, реализующих макросостояние, к полному числу возможных микросостояний.

Переход системы к наиболее вероятному состоянию

Чем больше Z_1, тем больше вероятность данного макросостояния и тем большее время система будет находиться в этом состоянии. Таким образом, *эволюция системы происходит в направлении перехода от маловероятных состояний к состояниям более вероятным*. Именно с этим связана необратимость течения макроскопических процессов, несмотря на обратимость законов, управляющих движением отдельных частиц. Обратный процесс не является невозможным, он просто маловероятен. Так как все микросостояния равновероятны, то в принципе может возникнуть макросостояние, реализуемое малым числом микросостояний, но это чрезвычайно редкое событие. Мы не должны удивляться, если никогда не увидим их. Наиболее вероятно состояние теплового равновесия. Ему отвечает наибольшее число микросостояний.

Легко понять, почему механическая энергия самопроизвольно переходит во внутреннюю. Механическое движение тела (или системы) — это упорядоченное движение, когда все части тела перемещаются идентично или сходным образом. Упорядоченному движению отвечает небольшое число микросостояний по сравнению с беспорядочным тепловым движением. Поэтому маловероятное состояние упорядоченного механического движения само собой превращается в беспорядочное тепловое движение, реализуемое гораздо большим числом микросостояний.

Менее нагляден процесс перехода теплоты от горячего тела к холодному. Но и здесь сущность необратимости та же.

В начале теплообмена есть две группы молекул: молекулы с более высокой средней кинетической энергией у горячего тела и молекулы с низкой средней кинетической энергией у холодного. При установлении теплового равновесия в конце процесса все молекулы окажутся принадлежащими к одной группе молекул с одной и той же средней кинетической энергией. Более упорядоченное состояние с разделением молекул на две группы перестаёт существовать.

Итак, необратимость процессов связана с тем, что неравновесные макроскопические состояния маловероятны. Эти состояния возникают либо естественным путём в результате эволюции Вселенной, либо же создаются искусственно человеком. Например, мы получаем сильно неравновесные состояния, нагревая рабочее тело теплового двигателя до температур, на сотни градусов превышающих температуру окружающей среды.

Расширение «газа» из четырёх молекул

Рассмотрим простой пример, позволяющий вычислить вероятности различных состояний и наглядно показывающий, как увеличение числа частиц в системе приводит к тому, что процессы становятся необратимыми, несмотря на обратимость законов движения микрочастиц.

Пусть у нас имеется «газ» в сосуде, состоящий всего лишь из четырёх молекул. Вначале все молекулы находятся в левой половине сосуда, отделённой перегородкой от правой половины (рис. 5.12, *а*). Уберём перегородку, и «газ» начнёт расширяться, занимая весь сосуд. Посмотрим, какова вероятность того, что «газ» опять сожмётся, т. е. молекулы снова соберутся в одной половине сосуда.

В нашем примере макросостояние будет характеризоваться указанием числа молекул в одной половине сосуда безот-

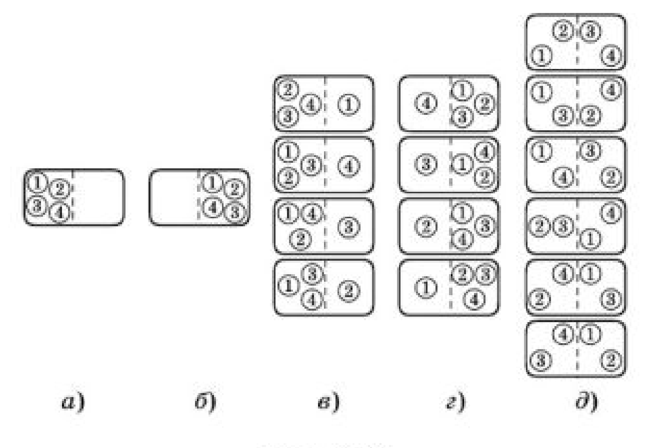


Рис. 5.12

носительно к тому, какие именно молекулы здесь находятся. Микросостояния задаются распределением молекул по половинам сосуда с указанием того, какие именно молекулы занимают данную половину сосуда. Пронумеруем молекулы цифрами *1*, *2*, *3*, *4*. Возможны 16 различных микросостояний, все они изображены на рисунке 5.12, *а—д*.

Вероятность того, что все молекулы соберутся в одной половине (например, левой) сосуда, равна

$$W_1 = \frac{Z_1}{Z} = \frac{1}{16},$$

так как данному макросостоянию соответствует одно микросостояние (см. рис. 5.12, *а*, *б*).

Вероятность же того, что молекулы распределятся поровну, будет в 6 раз больше:

$$W_2 = \frac{6}{16} = \frac{3}{8},$$

так как данному макросостоянию соответствует шесть микросостояний (см. рис. 5.12, *д*).

Вероятность того, что в одной половине сосуда (например, левой) будет три молекулы (а в другой соответственно одна молекула), равна (см. рис. 5.12, *в*, *г*)

$$W_3 = \frac{4}{16} = \frac{1}{4}.$$

Бóльшую часть времени молекулы будут распределены по половинам сосуда поровну: это наиболее вероятное состоя-

ние. Но примерно $\frac{1}{16}$ достаточно большого интервала времени наблюдения молекулы будут занимать одну из половин сосуда. Таким образом, процесс расширения обратим и «газ» снова сжимается через сравнительно небольшой промежуток времени.

Необратимость расширения газа с большим числом молекул

Но эта обратимость возможна лишь при небольшом числе молекул. Если же число молекул становится огромным, то результат существенно меняется. Подсчитаем вероятность события, когда молекулы вновь соберутся в одной половине сосуда после расширения, если число молекул произвольно.

Молекулы идеального газа практически движутся независимо друг от друга. Для одной молекулы вероятность того, что она окажется в левой половине сосуда, равна, очевидно, $\frac{1}{2}$. Такова же вероятность и для другой молекулы. Эти события независимы, и вероятность того, что первая и вторая молекулы соберутся в левой половине сосуда, равна произведению вероятностей: $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4} = \frac{1}{2^2}$. Для трёх молекул вероятность нахождения молекул в одной половине сосуда равна $\frac{1}{2^3}$, а для четырёх — $\frac{1}{2^4}$. Именно такое значение вероятности мы и получили при детальном рассмотрении распределения молекул по сосуду.

Но если взять реальное число молекул газа в 1 см^3 при нормальных условиях ($n = 3 \cdot 10^{19}$), то вероятность того, что молекулы соберутся в одной половине сосуда объёмом 1 см^3, будет совершенно ничтожна: $\frac{1}{2^{3 \cdot 10^{19}}}$.

Таким образом, только из-за большого числа молекул в макротелах процессы в природе оказываются практически необратимыми. В принципе обратные процессы возможны, но вероятность их близка к нулю. Не противоречит, строго говоря, законам природы процесс, в результате которого при случайном движении молекул все они соберутся в одной половине класса, а учащиеся в другой половине класса задохнутся. Но реально это событие никогда не происходило в прошлом и не произойдёт в будущем. Слишком мала вероятность подобного события, чтобы оно когда-либо

«Демон Максвелла»

Любопытный пример якобы возможного нарушения второго закона термодинамики придумал Максвелл. Разумное существо — «демон» — управляет очень лёгкой заслонкой в перегородке, разделяющей два отсека — A и B — с газом, находящимся при одинаковой температуре и давлении (рис. 5.13). «Демон» следит за молекулами, подлетающими к заслонке, и открывает её только для быстрых молекул, движущихся из отсека B в отсек A. В результате с течением времени газ в отсеке A нагревается, а в отсеке B остывает. Работа при этом не совершается, так как заслонка практически невесома, и второй закон термодинамики как будто нарушается.

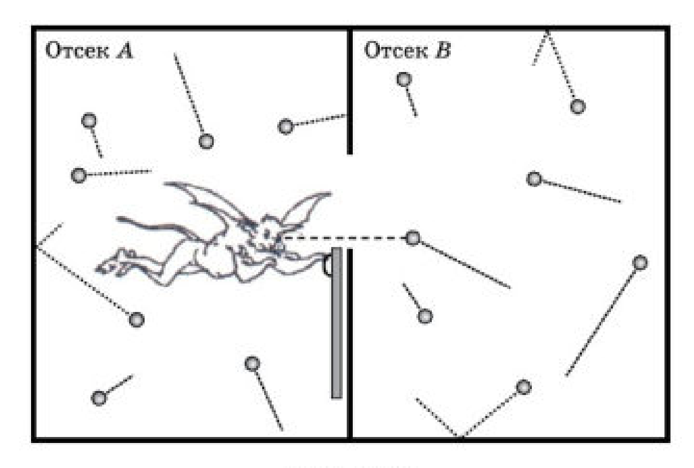


Рис. 5.13

Однако в действительности нарушения второго закона не происходит. Для своей работы «демон» должен получать информацию о скоростях подлетающих к заслонке молекул. Получить же такую информацию без затрат энергии невозможно. Для получения такой информации надо, к примеру, направлять на молекулы электромагнитное излучение и принимать отражённые сигналы.

> *Необратимость процессов в природе связана со стремлением систем к переходу в наиболее вероятное состояние, которому отвечает максимальный беспорядок.*

? 1. Определите понятия «макроскопическое состояние» и «микроскопическое состояние».

2. Как рассчитать вероятность макроскопического состояния? В чём отличие математической вероятности от вероятности макроскопического состояния?
3. В каком направлении происходит эволюция системы?
4. Сформулируйте границы применимости второго закона термодинамики.
5. Зачем Дж. Максвелл придумал «демона»?

§ 5.11. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Запасы внутренней энергии в океанах и земной коре можно считать практически неограниченными. Но располагать запасами энергии ещё недостаточно. Необходимо уметь за счёт энергии приводить в движение станки на фабриках и заводах, средства транспорта, тракторы и другие машины, вращать роторы генераторов электрического тока. Человечеству нужны двигатели — устройства, способные совершать работу.

Большая часть двигателей на Земле — **это тепловые двигатели, т. е. устройства, превращающие внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.**

Необратимость процессов в природе налагает определённые ограничения на возможность использования внутренней энергии для совершения работы тепловыми двигателями. Это прямо отражено во втором законе термодинамики в формулировке Кельвина (см. § 5.9).

Простейшая модель тепловой машины

Простейшую тепловую машину можно собрать из стакана с водой, капли анилина и горелки (рис. 5.14). Так как сосуд с водой подогревается снизу, то температура воды T_2 в верхних слоях, естественно, ниже, чем температура T_1 внизу.

Плотность анилина и плотность воды по-разному зависят от температуры. При T_1 плотность анилина меньше плотности воды, а при T_2 больше. Если влить холодный анилин в воду, то он опустится на дно. После нагревания плотность анилина уменьшается, и он всплывает. У поверхности вследствие ох-

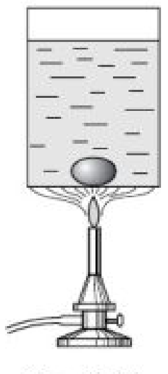


Рис. 5.14

лаждения плотность анилина станет больше плотности воды, и капля вновь опустится на дно. Затем весь цикл повторится.

При каждом цикле совершается положительная работа по преодолению трения при движении капли в воде. Если каплю внизу «нагружать», а вверху «разгружать», то такая тепловая машина может быть использована для подъёма груза.

Если покрыть стакан стеклянной пластинкой, то температура верхних слоёв воды увеличится и машина перестанет работать.

В нашей простейшей машине происходят процессы, общие для всех тепловых двигателей. Машина получает от нагревателя (горелки) количество теплоты Q_1 и передаёт холодильнику (в данном случае атмосфере) количество теплоты Q_2. За счёт того, что $Q_1 > Q_2$, и совершается работа.

Принципы действия тепловых двигателей

Чтобы двигатель совершал работу, необходима разность давлений по обе стороны поршня двигателя или лопастей турбины. Во всех тепловых двигателях эта разность давлений достигается за счёт повышения температуры рабочего тела на сотни градусов по сравнению с температурой окружающей среды. Такое повышение температуры происходит при сгорании топлива.

Рабочим телом у всех тепловых двигателей является газ (см. § 3.11), который совершает работу при расширении. Обозначим начальную температуру рабочего тела (газа) через T_1. Эту температуру в паровых турбинах или машинах приобретает пар в паровом котле. В двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах повышение температуры происходит при сгорании топлива внутри самого двигателя. Температуру T_1 называют температурой нагревателя.

Роль холодильника

По мере совершения работы газ теряет энергию и неизбежно охлаждается до некоторой температуры T_2. Эта температура не может быть ниже температуры окружающей среды, так как в противном случае давление газа станет меньше атмосферного и двигатель не сможет работать. Обычно температура T_2 несколько больше температуры окружающей среды. Её называют температурой хо-

лодильника. Холодильником являются атмосфера или специальные устройства для охлаждения и конденсации отработанного пара — конденсаторы. В последнем случае температура холодильника может быть несколько ниже температуры атмосферы.

Таким образом, в двигателе рабочее тело при расширении не может отдать всю свою внутреннюю энергию на совершение работы. Часть энергии неизбежно передаётся атмосфере (холодильнику) вместе с отработанным паром или выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин. Эта часть внутренней энергии безвозвратно теряется. Именно об этом и говорит второй закон термодинамики в формулировке Кельвина.

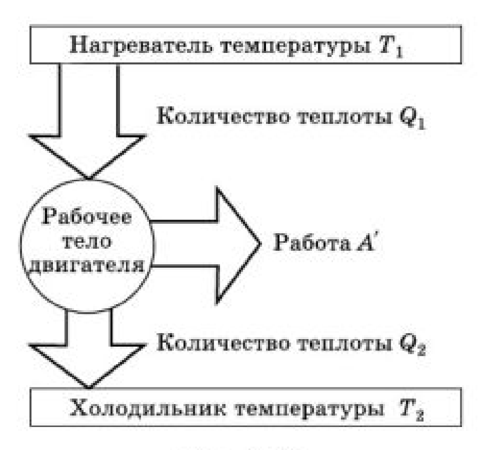


Рис. 5.15

Принципиальная схема теплового двигателя изображена на рисунке 5.15. Рабочее тело двигателя получает при сгорании топлива количество теплоты Q_1, совершает работу A' и передаёт холодильнику количество теплоты $|Q_2| < |Q_1|$.

КПД теплового двигателя

Согласно закону сохранения энергии работа, совершаемая двигателем, равна

$$A' = Q_1 + Q_2, \qquad (5.11.1)$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное от нагревателя, а Q_2 — количество теплоты, отданное холодильнику.

Коэффициентом полезного действия теплового двигателя называют отношение работы A', совершаемой двигателем, к количеству теплоты, полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}. \qquad (5.11.2)$$

У паровой турбины нагревателем является паровой котёл, а у двигателей внутреннего сгорания — сами продукты сгорания топлива.

Так как у всех двигателей некоторое количество теплоты передаётся холодильнику, то $\eta < 1$.

Применение тепловых двигателей

Наибольшее значение имеет использование тепловых двигателей (в основном мощных паровых турбин) на тепловых электростанциях, где они приводят в движение роторы генераторов электрического тока. Около 80% всей электроэнергии в нашей стране вырабатывается на тепловых электростанциях.

Тепловые двигатели (паровые турбины) устанавливают также на атомных электростанциях. На этих станциях для получения пара высокой температуры используется энергия атомных ядер.

На всех основных видах современного транспорта преимущественно используются тепловые двигатели. На автомобилях применяют поршневые двигатели внутреннего сгорания с внешним образованием горючей смеси (карбюраторные двигатели) и двигатели с образованием горючей смеси непосредственно внутри цилиндров (дизели). Эти же двигатели устанавливаются на тракторах.

На железнодорожном транспорте до середины XX в. основным двигателем была паровая машина. Теперь же главным образом используют тепловозы с дизельными установками и электровозы. Но и электровозы получают энергию от тепловых двигателей электростанций.

На водном транспорте используются как двигатели внутреннего сгорания, так и мощные турбины для крупных судов.

В авиации на лёгких самолётах устанавливают поршневые двигатели, а на огромных лайнерах — турбовинтовые и реактивные двигатели, которые также относятся к тепловым двигателям. Реактивные двигатели применяются и на космических ракетах.

Без тепловых двигателей современная цивилизация немыслима. Мы не имели бы дешёвую электроэнергию и были бы лишены всех видов современного скоростного транспорта.

Тепловые двигатели и охрана природы

Неуклонный рост энергетических мощностей, всё большее распространение укрощённого огня — в топках и котлах тепловых электростанций, фабрик и заводов, котельных городов и сёл, в двигателях внутреннего сгорания, в ракетах и авиационных двигателях — приводит к тому, что количество выделяемой теплоты становится сопоставимым с другими компонентами теплового баланса в атмосфере. Это не может не приводить к повышению средней температуры на Земле. Сейчас мощность двигателей составляет примерно 10^{10} кВт. Когда эта мощность достигнет $3 \cdot 10^{12}$ кВт, то средняя температура атмосферы Земли повысится примерно на 1 °С. Дальнейшее повышение температуры может создать угрозу таяния ледников и катастрофического повышения уровня Мирового океана. Но этим далеко не исчерпываются негативные последствия применения тепловых двигателей. Растёт выброс в атмосферу микроскопических частиц — сажи, пепла, измельчённого топлива. Они изменяют оптические свойства атмосферы, соотношение между поглощённой и отражённой солнечной энергией, увеличивают «парниковый эффект», обусловленный повышением концентрации углекислого газа в течение длительного промежутка времени. Углекислый газ задерживает тепловое излучение Земли, что приводит к повышению температуры атмосферы.

Выбрасываемые в атмосферу токсические продукты горения: оксиды серы, азота, металлов, угарный газ (CO), канцерогенные вещества — продукты неполного сгорания органических топлив — оказывают вредное воздействие на флору и фауну. Особую опасность в этом отношении представляют автомобили, число которых угрожающе растёт, а очистка отработанных газов затруднена.

Всё это ставит ряд серьёзных проблем перед обществом. Наряду с важнейшей задачей повышения КПД тепловых двигателей требуется проводить ряд мероприятий по охране окружающей среды. Необходимо повышать эффективность сооружений, препятствующих выбросу в атмосферу вредных веществ; добиваться более полного сгорания топлива в автомобильных двигателях. Уже сейчас не допускаются к эксплуатации автомобили с повышенным содержанием CO в от-

работанных газах. Осуществляется перевод автомобильных двигателей на сжиженный газ в качестве топлива. Обсуждается возможность применения в качестве топлива водорода, в результате сгорания которого образуется вода.

Другое направление прилагаемых усилий — это увеличение эффективности использования энергии, экономия её на производстве и в быту. Нельзя оставлять невыключенными электроприборы, допускать бесполезные потери топлива при обогревании помещений. Примером нерационального использования энергии служат попытки введения в эксплуатацию гражданских сверхзвуковых самолётов, потребляющих в 8 раз больше топлива, чем обычные.

Решение перечисленных проблем жизненно важно для человека. Организация охраны окружающей среды требует усилий в масштабе земного шара.

Бо́льшую часть механической и электрической энергии вырабатывают тепловые двигатели. Пока равноценной замены им нет. В то же время тепловые двигатели оказывают отрицательное влияние на окружающую среду и условия существования человека на Земле.

? **1.** Изобразите принципиальные схемы тепловой и холодильной машин.

2. Как определить коэффициент полезного действия теплового двигателя?

§ 5.12. МАКСИМАЛЬНЫЙ КПД ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Из-за того что часть теплоты при работе тепловых двигателей неизбежно передаётся холодильнику, КПД двигателей не может равняться единице. Представляет большой интерес нахождение максимально возможного КПД теплового двигателя, работающего с нагревателем температуры T_1 и холодильником температуры T_2. Впервые это сделал французский инженер и учёный Сади Карно.

Идеальная тепловая машина Карно

Карно придумал идеальную тепловую машину с идеальным газом в качестве рабочего тела. Все процессы в машине Карно рассматриваются как равновесные (обратимые).

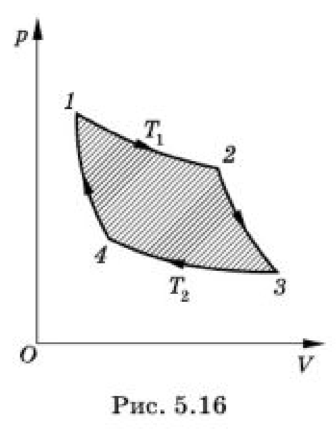


Рис. 5.16

В машине осуществляется круговой процесс или цикл, при котором система после ряда преобразований возвращается в исходное состояние. Цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат (рис. 5.16). Кривые *1—2* и *3—4* — это изотермы, а *2—3* и *4—1* — адиабаты.

Сначала газ расширяется изотермически при температуре T_1. При этом он получает от нагревателя количество теплоты Q_1. Затем он расширяется адиабатно и не обменивается теплотой с окружающими телами. Далее следует изотермическое сжатие газа при температуре T_2. Газ отдаёт в этом процессе холодильнику количество теплоты Q_2. Наконец газ сжимается адиабатно и возвращается в начальное состояние.

При изотермическом расширении газ совершает работу $A_1' > 0$, равную количеству теплоты Q_1. При адиабатном расширении *2—3* положительная работа A_3' равна уменьшению внутренней энергии при охлаждении газа от температуры T_1 до температуры T_2: $A_3' = -\Delta U_{12} = U(T_1) - U(T_2)$.

Изотермическое сжатие при температуре T_2 требует совершения над газом работы A_2. Газ совершает соответствен-

---



Карно Николá Леонар Сади (1796—1832) — талантливый французский инженер и физик, один из основателей термодинамики. В своём труде «Размышление о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824) впервые показал, что тепловые двигатели могут совершать работу лишь в процессе перехода теплоты от горячего тела к холодному. Карно придумал идеальную тепловую машину, вычислил коэффициент полезного действия идеальной машины и доказал, что этот коэффициент является максимально возможным для любого реального теплового двигателя.

но отрицательную работу $A'_2 = -A_2 = Q_2$. Наконец, адиабатное сжатие требует совершения над газом работы $A_4 = \Delta U_{21}$. Работа самого газа $A'_4 = -A_4 = -\Delta U_{21} = U(T_2) - U(T_1)$. Поэтому суммарная работа газа при двух адиабатных процессах равна нулю.

За цикл газ совершает работу

$$A' = A'_1 + A'_2 = Q_1 + Q_2 = |Q_1| - |Q_2|. \qquad (5.12.1)$$

Эта работа численно равна площади фигуры, ограниченной кривой цикла (заштрихована на рис. 5.16).

Для вычисления коэффициента полезного действия нужно вычислить работы при изотермических процессах *1—2* и *3—4*. Расчёты приводят к следующему результату:

$$\boxed{\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.} \qquad (5.12.2)$$

Коэффициент полезного действия тепловой машины Карно равен отношению разности абсолютных температур нагревателя и холодильника к абсолютной температуре нагревателя.

Можно выразить работу, совершаемую машиной за цикл, и количество отданной холодильнику теплоты Q_2 через КПД машины и полученное от нагревателя количество теплоты Q_1. Согласно определению КПД

$$A' = \eta Q_1. \qquad (5.12.3)$$

Количество теплоты

$$Q_2 = A' - Q_1 = \eta Q_1 - Q_1 = Q_1(\eta - 1). \qquad (5.12.4)$$

Так как $\eta < 1$, то

$$|Q_2| = (1 - \eta)Q_1. \qquad (5.12.5)$$

Идеальная холодильная машина

Цикл Карно обратим, поэтому его можно провести в обратном направлении. Это будет уже не тепловая машина, а идеальная холодильная машина.

Процессы пойдут в обратном порядке. Работа A совершается для приведения в действие машины. Количество теплоты Q_1 передаётся рабочим телом нагревателю более высокой температуры, а количество теплоты Q_2 поступает к рабочему

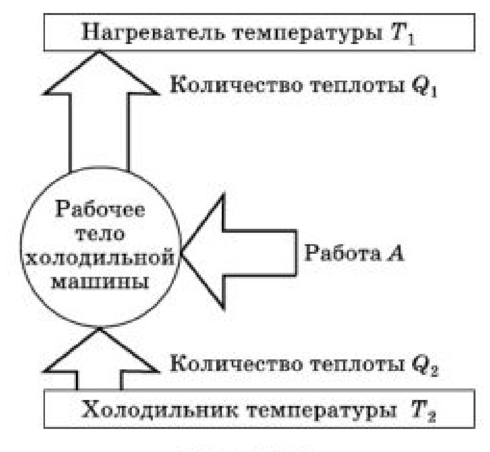


Рис. 5.17

телу от холодильника (рис. 5.17). Теплота передаётся от холодного тела к горячему, поэтому машина и называется холодильной. Но второму закону термодинамики это не противоречит: теплота переходит не сама собой, а за счёт совершения работы.

Выразим количества теплоты Q_1 и Q_2 через работу A и КПД машины η. Так как согласно формуле (5.12.3) $A' = \eta Q_1 = -A$, то

$$Q_1 = -\frac{A}{\eta}. \quad (5.12.6)$$

Передаваемое рабочим телом количество теплоты, как всегда, отрицательно. Очевидно, $|Q_1| = \frac{A}{\eta}$. Согласно выражению (5.12.4) количество теплоты $Q_2 = Q_1(\eta - 1)$ или, с учётом соотношения (5.12.3),

$$Q_2 = \frac{1-\eta}{\eta}A > 0. \quad (5.12.7)$$

Такое количество теплоты получает рабочее тело от холодильника.

Холодильная машина работает как тепловой насос*. Горячему телу передаётся количество теплоты Q_1, большее того

* Однако это не означает, что холодильная машина и тепловой насос — это одно и то же. Назначение холодильной машины — охлаждать некоторый резервуар, передавая теплоту в окружающую среду. Назначение теплового насоса — нагревать резервуар, забирая теплоту из окружающей среды.

количества, которое забирается от холодильника. Согласно формуле (5.12.7) $Q_2 = \frac{A}{\eta} - A = -Q_1 - A$. Отсюда

$$|Q_1| = A + Q_2. \qquad (5.12.8)$$

Эффективность холодильной машины определяется отношением $\varepsilon = \frac{Q_2}{A}$, так как её назначение — отнимать как можно большее количество теплоты от охлаждаемой системы при совершении как можно меньшей работы. Величина ε называется холодильным коэффициентом. Для идеальной холодильной машины согласно формулам (5.12.7) и (5.12.2)

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}, \qquad (5.12.9)$$

т. е. холодильный коэффициент тем больше, чем меньше разность температур, и тем меньше, чем меньше температура того тела, от которого отбирается теплота. Очевидно, холодильный коэффициент может быть больше единицы. Для реальных холодильников он более трёх. Разновидностью холодильной машины является кондиционер, который забирает теплоту из комнаты и передаёт её окружающему воздуху.

Тепловой насос

При отоплении помещений электрообогревателями энергетически выгоднее использовать тепловой насос, а не просто нагреваемую током спираль. Насос дополнительно будет передавать в помещение количество теплоты Q_2 из окружающего воздуха. Однако это не делают из-за дороговизны холодильной установки по сравнению с обычной электрической печкой или камином.

При использовании теплового насоса практический интерес представляет количество теплоты Q_1, получаемое нагреваемым телом, а не количество теплоты Q_2, отдаваемое холодному телу. Поэтому характеристикой теплового насоса является так называемый отопительный коэффициент $\varepsilon_{от} = \frac{|Q_1|}{A}$.

Для идеальной машины, учитывая соотношения (5.12.6) и (5.12.2), будем иметь

$$\varepsilon_{от} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}, \qquad (5.12.10)$$

где T_1 — абсолютная температура нагреваемого помещения, а T_2 — абсолютная температура атмосферного воздуха. Таким образом, отопительный коэффициент всегда больше единицы. Для реальных устройств при температуре окружающей среды $t_2 = 0$ °С и температуре помещения $t_1 = 25$ °С $\varepsilon_{от} \approx 12$. В помещение передаётся количество теплоты, почти в 12 раз превышающее количество затраченной электроэнергии.

Максимальный КПД тепловых машин (теорема Карно)

Главное значение полученной Карно формулы (5.12.2) для КПД идеальной машины состоит в том, что она определяет максимально возможный КПД любой тепловой машины.

Карно доказал, основываясь на втором законе термодинамики*, следующую теорему: **любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем температуры T_1 и холодильником температуры T_2, не может иметь коэффициент полезного действия, превышающий КПД идеальной тепловой машины.**

Рассмотрим вначале тепловую машину, работающую по обратимому циклу с реальным газом. Цикл может быть любым, важно лишь, чтобы температуры нагревателя и холодильника были T_1 и T_2.

Допустим, что КПД другой тепловой машины (не работающей по циклу Карно) $\eta' > \eta$. Машины работают с общим нагревателем и общим холодильником. Пусть машина Карно работает по обратному циклу (как холодильная машина), а другая машина — по прямому циклу (рис. 5.18). Тепловая машина совершает работу, равную согласно формулам (5.12.3) и (5.12.5)

$$A' = \eta' Q_1' = \frac{\eta'}{1 - \eta'}|Q_2'|. \qquad (5.12.11)$$

Холодильную машину всегда можно сконструировать так, чтобы она брала от холодильника количество теплоты

---

* Карно фактически установил второй закон термодинамики до Клаузиуса и Кельвина, когда ещё первый закон термодинамики не был сформулирован строго.

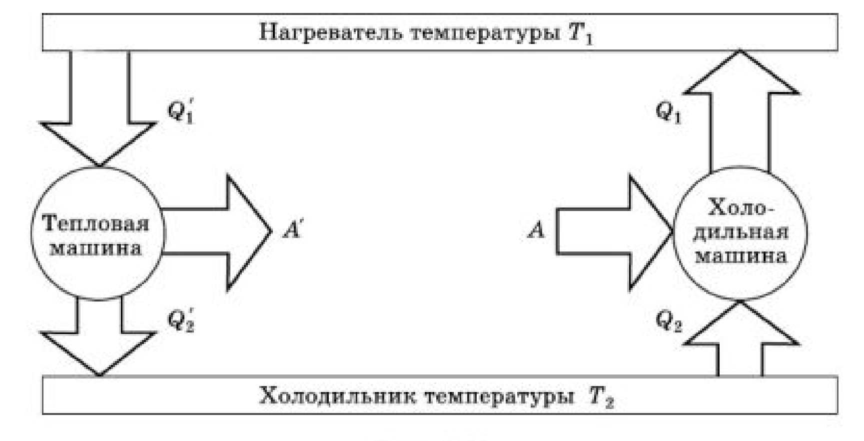


Рис. 5.18

$Q_2 = |Q_2'|$. Тогда согласно формуле (5.12.7) над ней будет совершаться работа

$$A = \frac{\eta'}{1 - \eta'}|Q_2'|. \qquad (5.12.12)$$

Так как по условию $\eta' > \eta$, то $A' > A$. Поэтому тепловая машина может привести в действие холодильную машину, да ещё останется избыток работы. Эта избыточная работа совершается за счёт теплоты, взятой от одного источника. Ведь холодильнику при действии сразу двух машин теплота не передаётся. Но это противоречит второму закону термодинамики.

Если допустить, что $\eta > \eta'$, то можно другую машину заставить работать по обратному циклу, а машину Карно — по прямому. Мы опять придём к противоречию со вторым законом термодинамики. Следовательно, две машины, работающие по обратимым циклам, имеют одинаковые КПД: $\eta' = \eta$.

Иное дело, если вторая машина работает по необратимому циклу. Если допустить $\eta' > \eta$, то мы опять придём к противоречию со вторым законом термодинамики. Однако допущение $\eta' < \eta$ не противоречит второму закону термодинамики, так как необратимая тепловая машина не может работать как холодильная машина. Следовательно, КПД любой тепловой машины $\eta' \leqslant \eta$, или

$$\eta' \leqslant \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Это и есть основной результат:

$$\boxed{\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.} \qquad (5.12.13)$$

КПД реальных тепловых машин

Формула (5.12.13) даёт теоретический предел для максимального значения КПД тепловых двигателей. Она показывает, что тепловой двигатель тем эффективнее, чем выше температура нагревателя и ниже температура холодильника. Лишь при температуре холодильника, равной абсолютному нулю, $\eta = 1$.

Но температура холодильника практически не может быть намного ниже температуры окружающего воздуха. Повышать температуру нагревателя можно. Однако любой материал (твёрдое тело) обладает ограниченной теплостойкостью, или жаропрочностью. При нагревании он постепенно утрачивает свои упругие свойства, а при достаточно высокой температуре плавится.

Сейчас основные усилия инженеров направлены на повышение КПД двигателей за счёт уменьшения трения их частей, потерь топлива вследствие его неполного сгорания и т. д. Реальные возможности для повышения КПД здесь всё ещё остаются большими. Так, для паровой турбины начальные и конечные температуры пара примерно таковы: $T_1 = 800$ К и $T_2 = 300$ К. При этих температурах максимальное значение коэффициента полезного действия равно

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \approx 0{,}62 = 62\%.$$

Действительное же значение КПД из-за различного рода энергетических потерь приблизительно равно 40%. Максимальный КПД — около 44% — имеют двигатели внутреннего сгорания.

Коэффициент полезного действия любого теплового двигателя не может превышать максимально возможного значения $\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, где T_1 — абсолютная температура нагревателя, а T_2 — абсолютная температура холодильника.
Повышение КПД тепловых двигателей и приближение его к максимально возможному — важнейшая техническая задача.

? 1. Изобразите цикл идеальной тепловой машины и назовите процессы, из которых он состоит.
2. Определите коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины.
3. Опишите принцип действия идеальной холодильной машины.
4. Какую величину называют холодильным коэффициентом?

§ 5.13. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач на применение материала этой главы используется формула (5.1.2) или (5.1.3) для вычисления работы при изобарном изменении объёма газа, выражение (5.2.5) для количества теплоты, полученного телом при его нагревании или отданного им при охлаждении, а также уравнение теплового баланса (5.2.6).

Значительное количество задач решается с помощью первого закона термодинамики в форме $\Delta U = A + Q$ или $Q = \Delta U + A'$. Надо иметь в виду, что величины A, Q и ΔU могут быть как положительными, так и отрицательными. В ряде случаев используются частные формулировки первого закона термодинамики для изотермического, изобарного, изохорного и адиабатного процессов.

При решении задач на тепловые двигатели применяются выражения для КПД (5.11.2) и (5.12.13).

Во многих случаях понадобится применять газовые законы и выражение для внутренней энергии одноатомного идеального газа $U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT$.

Задача 1

Вычислите работу идеального газа массой m при его изобарном нагревании на ΔT.

Решение. Обозначим постоянное давление газа через p, начальный и конечный объёмы газа — соответственно через V_1 и V_2, а начальную и конечную температуры — через T_1 и T_2. Согласно уравнению Менделеева—Клапейрона имеем

$$pV_1 = \frac{m}{M}RT_1, \quad pV_2 = \frac{m}{M}RT_2,$$

где M — молярная масса газа.

Относительно температур t и t' можно высказать три предположения: 1) $t > t'$; 2) $t = t'$ и 3) $t < t'$.

В первом случае в уравнении (5.13.5) левая часть больше единицы, а правая меньше. Значит, первое предположение несправедливо. Во втором случае ($t = t'$) левая часть уравнения (5.13.5) равна единице, а правая равна $\frac{6}{13}$. Следовательно, неверно и второе предположение.

Таким образом, правильным является третье утверждение: $t < t'$, т. е. при опускании металла вода нагреется больше.

Задача 3

После опускания в воду, имеющую температуру $t_1 = 10$ °C, тела, нагретого до температуры $t_2 = 100$ °C, через некоторое время установилась общая температура $t = 40$ °C. Какой станет температура воды t', если, не вынимая первого тела, в неё опустить ещё одно такое же тело, нагретое тоже до температуры $t_2 = 100$ °C?

Решение. Пренебрегая нагреванием сосуда и тепловыми потерями, запишем уравнение теплового баланса после опускания первого тела:

$$c_в m_в (t - t_1) + c_т m_т (t - t_2) = 0, \qquad (5.13.6)$$

где $c_в$ и $c_т$ — удельные теплоёмкости воды и тела, а $m_в$ и $m_т$ — массы воды и тела.

После опускания ещё одного такого же тела имеем

$$c_в m_в (t' - t) + c_т m_т (t' - t) + c_т m_т (t' - t_2) = 0. \qquad (5.13.7)$$

Преобразуем уравнения (5.13.6) и (5.13.7) так:

$$c_в m_в (t - t_1) = c_т m_т (t_2 - t),$$
$$c_в m_в (t' - t) = c_т m_т (t_2 + t - 2t').$$

После почленного деления второго уравнения на первое получим

$$\frac{t' - t}{t - t_1} = \frac{t_2 + t - 2t'}{t_2 - t}.$$

Отсюда

$$t' = \frac{t_2(2t - t_1) - t_1 t}{t_2 + t - 2t_1} \approx 55 \text{ °C}.$$

Задача 4

В цилиндре под тяжёлым поршнем, перемещающимся без трения, находится углекислый газ массой $m = 20$ г. Газ нагревается от температуры $t_1 = 20$ °С до температуры $t_2 = 108$ °С.

Какое количество теплоты было при этом сообщено газу? Молярная теплоёмкость углекислого газа (теплоёмкость 1 моль) при постоянном объёме $C_V = 28{,}8$ Дж/(К · моль).

Решение. Молярная теплоёмкость при постоянном давлении согласно формуле (5.6.7) равна

$$C_p = C_V + R.$$

Удельная теплоёмкость

$$c_p = \frac{C_p}{M} = \frac{C_V + R}{M},$$

где M — молярная масса газа.

Следовательно, искомое количество теплоты

$$Q = c_p m\,(t_2 - t_1) = \frac{m}{M}(t_2 - t_1)(C_V + R) = 1480 \text{ Дж}.$$

Задача 5

В двух цилиндрах, имеющих объёмы $V_1 = 3$ л и $V_2 = 5$ л, находится одинаковый газ при давлениях $p_1 = 0{,}4$ МПа и $p_2 = 0{,}6$ МПа и температурах $t_1 = 27$ °С и $t_2 = 127$ °С. Цилиндры соединяют трубкой с краном. Определите, какая температура T и какое давление p установятся в цилиндрах после того, как кран соединительной трубки будет открыт.

Решение. Внутренние энергии газа в первом цилиндре, газа во втором цилиндре и газа в цилиндрах после смешивания соответственно равны $U_1 = b\nu_1 T_1$, $U_2 = b\nu_2 T_2$ и $U = b(\nu_1 + \nu_2)T$. Здесь b — коэффициент пропорциональности, зависящий от природы газа (для одноатомного газа $b = \frac{3}{2}R$); ν_1 — число молей газа в первом цилиндре; ν_2 — число молей газа во втором цилиндре.

Согласно закону сохранения энергии

$$U = U_1 + U_2, \qquad (5.13.8)$$

или

$$\nu_1 T_1 + \nu_2 T_2 = (\nu_1 + \nu_2)T. \qquad (5.13.9)$$

Отсюда

$$T = \frac{\nu_1 T_1 + \nu_2 T_2}{\nu_1 + \nu_2}. \qquad (5.13.10)$$

Из уравнений состояния до смешивания газов следует

$$p_1 V_1 = \nu_1 R T_1, \quad p_2 V_2 = \nu_2 R T_2.$$

Выразим отсюда количества газов:

$$\nu_1 = \frac{p_1 V_1}{R T_1}, \quad \nu_2 = \frac{p_2 V_2}{R T_2}. \qquad (5.13.11)$$

Подставив значения ν_1 и ν_2 в формулу (5.13.10), получим

$$T = \frac{T_1 T_2 (p_1 V_1 + p_2 V_2)}{p_1 V_1 T_2 + p_2 V_2 T_1} = 366 \text{ К, или } 93 \text{ °С}.$$

Из уравнения состояния для смеси газов

$$p(V_1 + V_2) = (\nu_1 + \nu_2) R T,$$

используя найденные значения для ν_1, ν_2 и T, получим

$$p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2} = 525 \text{ кПа}.$$

Задача 6

В цилиндре под поршнем находится газ, состояние которого меняется следующим образом: при переходе из состояния *1* в состояние *2* давление увеличивается при постоянном объёме V; при переходе *2—3* увеличивается объём при постоянном давлении p_1; переход *3—4* происходит с увеличением объёма при постоянной температуре; при переходе *4—1* газ возвращается к первоначальному состоянию при постоянном давлении p_2. Изобразите в координатах p, V; p, T и V, T графики изменения состояния газа и определите, при каких процессах газ получает теплоту, при каких отдаёт; как при этом меняется температура и какая работа совершается газом.

Решение. График изменения состояния в координатах p, V приведён на рисунке 5.19. Процесс *1—2* — нагревание при постоянном объёме, температура увеличивается ($T_2 > T_1$), следовательно, к газу подводится некоторое коли-

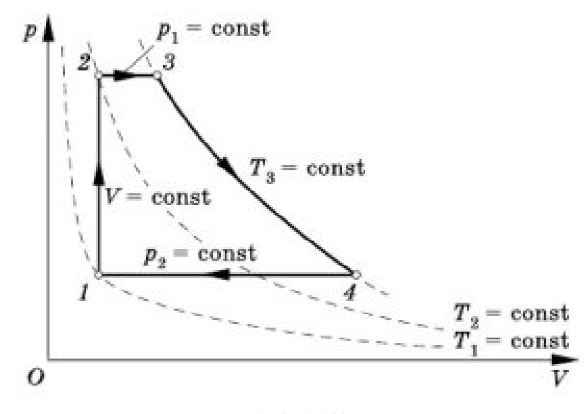


Рис. 5.19

чество теплоты ($Q > 0$); работы газ не совершает ($V = \text{const}$, $A'_1 = 0$).

Процесс *2—3* — изобарное расширение; температура увеличивается ($T_3 > T_2$); газ совершает положительную работу ($A'_2 > 0$). Это видно из формулы $A'_2 = p_1(V_3 - V_2)$. Так как температура увеличивается, то внутренняя энергия тоже увеличивается, т. е. $\Delta U > 0$. Поэтому из первого закона термодинамики в форме $Q = \Delta U + A'_2$ следует, что $Q > 0$, и при этом процессе к газу подводится некоторое количество теплоты.

Процесс *3—4* — изотермическое расширение; температура остаётся постоянной. Газ совершает положительную работу, так как он расширяется ($A'_3 > 0$). Для изотермического процесса первый закон термодинамики имеет вид $Q = A'_3$, поэтому $Q > 0$, т. е. теплота поглощается газом.

Процесс *4—1* — изобарное сжатие ($V_1 < V_4$); температура уменьшается ($T_1 < T_4$). Газ совершает отрицательную работу: $A'_4 = p_2(V_1 - V_4)$. Так как газ охлаждается, то его внутренняя энергия уменьшается ($\Delta U < 0$). Следовательно, как видно из первого закона термодинамики: $Q = \Delta U + A'_4$, газ отдаёт некоторое количество теплоты окружающим телам ($Q < 0$).

Графики изменения состояния в координатах p, T и V, T приведены на рисунках 5.20 и 5.21.

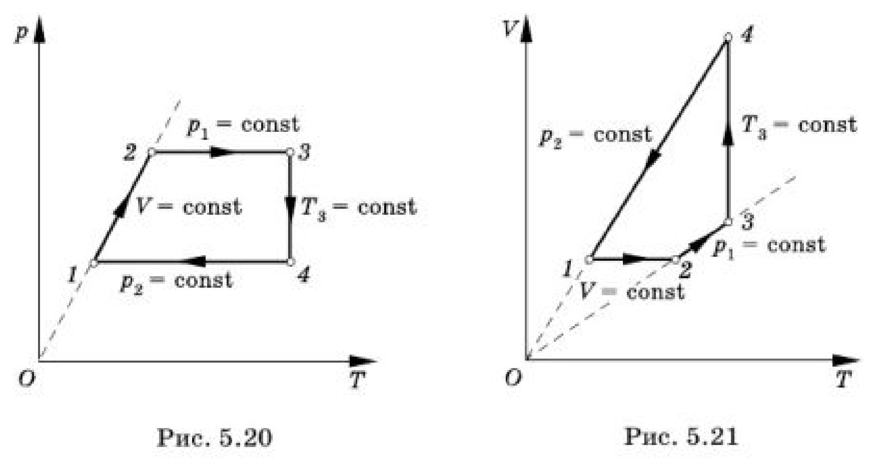


Рис. 5.20

Рис. 5.21

Задача 7

Одноатомный идеальный газ при давлении $p_1 = 3 \cdot 10^5$ Па и температуре $t_1 = 0$ °С занимает объём $V_1 = 2$ м^3. Газ сжимают без теплообмена с окружающей средой, совершая при этом работу $A = 35$ кДж. Найдите конечную температуру газа T_2.

Решение. Согласно формуле (15.8.1) для одноатомного идеального газа изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R(T_2 - T_1). \qquad (5.13.12)$$

Из уравнения Менделеева—Клапейрона для начального состояния газа $p_1V_1 = RT_1$ найдём

$$\frac{m}{M}R = \frac{p_1V_1}{T_1}. \qquad (5.13.13)$$

Подставляя выражение (5.13.13) в уравнение (5.13.12), получим

$$\Delta U = \frac{3}{2}\frac{p_1V_1}{T_1}(T_2 - T_1). \qquad (5.13.14)$$

Так как газ сжимают без теплообмена с окружающей средой (адиабатный процесс), то в соответствии с первым законом термодинамики имеем

$$\Delta U = A.$$

Следовательно, уравнение (5.13.14) можно записать так:

$$A = \frac{3}{2}\frac{p_1V_1}{T_1}(T_2 - T_1).$$

Откуда

$$T_2 = T_1\left(1 + \frac{2A}{3p_1V_1}\right) \approx 284 \text{ К, или } 11\ ^\circ\text{C}.$$

Задача 8

Увеличится ли внутренняя энергия воздуха в комнате, если в ней протопить печь?

Решение. Энергия единицы объёма газа пропорциональна произведению абсолютной температуры газа на его плотность:

$$U_1 = c\rho T,$$

где c — постоянный коэффициент пропорциональности.

Согласно уравнению состояния идеального газа

$$\frac{pV}{T} = mB,$$

где B — постоянная величина.

Так как $\rho = \frac{m}{M}$, то $\rho T = \frac{p}{B}$. Следовательно, $U_1 = \frac{c}{B}p$, т. е. энергия определяется только давлением. Давление же в комнате равно атмосферному и не меняется при нагревании воздуха в комнате. Нагреваясь, воздух частично вытекает через щели наружу, что и обеспечивает постоянство энергии, несмотря на нагревание. Только в герметически закрытой комнате внутренняя энергия возрастала бы с нагреванием.

Задача 9

Тепловая машина совершает работу $A = 2 \cdot 10^3$ Дж при затрате количества теплоты $Q_1 = 4 \cdot 10^3$ Дж. Известно, что КПД такой машины составляет 0,75 (75%) максимально возможного КПД (η_{max}). Определите температуру нагревателя машины t_1, если температура холодильника $t_2 = 0$ °C.

Решение. Согласно условию задачи КПД тепловой машины равен

$$\eta = 0{,}75\,\frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

По определению

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{A}{Q_1}.$$

Отсюда

$$T_1 = \frac{0{,}75Q_1T_2}{0{,}75Q_1 - A},$$

или

$$t_1 = \frac{0{,}75Q_1(t_2 + 273)}{0{,}75Q_1 - A} - 273 = 546\ ^\circ\text{C}.$$

Упражнение 4

1. Если бы реки потекли вспять, означало бы это нарушение закона сохранения энергии?
2. Покажите, что нарушение второго закона термодинамики в формулировке Клаузиуса ведёт к нарушению второго закона термодинамики в формулировке Кельвина.
3. Понизится ли температура в комнате, если открыть дверцу работающего холодильника?
4. В вертикальном цилиндре под поршнем, площадь поперечного сечения которого $S = 20$ см^2, находится столб газа высотой $h = 60$ см при температуре $t = 27$ °C. Поршень может перемещаться без трения. Масса поршня $m = 10$ кг. Цилиндр нагрели на $\Delta T = 50$ К. Определите работу A', совершённую газом. Атмосферное давление $p = 10^5$ Па.
5. Каковы первоначальная температура и объём гелия, находящегося под поршнем в цилиндре, если при охлаждении газа до $t = -23$ °C поршень с лежащим на нём грузом общей массой $m_1 = 16$ кг совершает работу $A = 400$ Дж? Площадь поршня $S = 200$ см^2, атмосферное давление p_0 нормальное, масса гелия $m_1 = 5$ г.
6. При изобарном расширении некоторого количества идеального газа он совершает работу $A = 4000$ Дж. Определите количество теплоты Q_1, полученное газом. Молярная теплоёмкость газа при постоянном давлении $C_p = 21$ Дж/(моль · К).
7. В сосуд с водой при температуре $t_0 = 0$ °C опустили цилиндрический медный стержень, нагретый до температуры $t_1 = 300$ °C, после чего температура воды повысилась до $t = 23$ °C. Объём воды $V = 10$ л; площадь сечения стерж-

ня $S = 20$ см². Определите длину стержня l. Плотность меди $\rho_м = 8{,}9 \cdot 10^3$ кг/м³. Удельная теплоёмкость воды $c_в = 4{,}19 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), удельная теплоёмкость меди $c_м = 380$ Дж/(кг · К). Нагреванием сосуда, а также потерями тепла пренебречь.

8. В калориметр теплоёмкостью $C = 63$ Дж/К было налито масло массой $m_1 = 250$ г при температуре $t_1 = 12$ °С. После опускания в масло медного тела массой $m_2 = 500$ г при температуре $t_2 = 100$ °С установилась температура $t = 33$ °С. Какова удельная теплоёмкость c_1 масла по данным опыта? Удельная теплоёмкость меди $c_2 = 380$ Дж/(кг · К).

9. Стальной осколок снаряда, падая с высоты $h = 500$ м, имел у поверхности Земли скорость $v = 50$ м/с. На сколько градусов увеличится температура осколка при падении? Считать, что механическая энергия, потерянная осколком, полностью превратилась во внутреннюю энергию. Удельная теплоёмкость стали $c = 460$ Дж/(кг · К).

10. На тележку массой M, двигающуюся горизонтально с постоянной скоростью $\vec{v}_0$, опускают сверху кирпич массой m. Определите, какое количество теплоты при этом выделится.

11. Свинцовая дробинка, летящая со скоростью $v = 100$ м/с, попала в доску и застряла в ней. На сколько градусов повысилась температура дробинки, если 50% механической энергии дробинки превратилось во внутреннюю энергию?

12. Предложен следующий проект вечного двигателя (рис. 5.22). Закрытый сосуд разделён на две половины герметичной перегородкой, сквозь которую пропущены трубка и водяная турбина в кожухе с двумя отверстиями. Давление воздуха в нижней части больше, чем в верхней. Вода поднимается по трубке и наполняет открытую камеру. В нижней части очередная порция воды выливается из камеры турбины, подошедшей к отверстию кожуха. Почему машина не будет работать вечно?

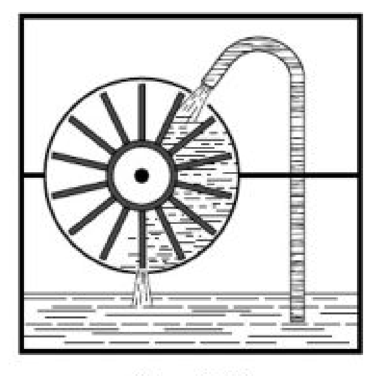


Рис. 5.22

13. В вертикальном цилиндре под тяжёлым поршнем находится кислород массой $m = 2$ кг. Для повышения температуры кислорода на $\Delta T = 5$ К ему сообщили количество теплоты $Q_1 = 9160$ Дж. Найдите работу, совершённую кислородом при расширении, и увеличение его внутренней энергии.

14. В теплоизолированном цилиндре с поршнем находится азот массой $m = 0,2$ кг при температуре $t_1 = 20$ °C. Азот, расширяясь, совершает работу $A' = 4470$ Дж. Найдите изменение внутренней энергии азота и его температуру после расширения. Удельная теплоёмкость азота при постоянном объёме $c_V = 745$ Дж/(кг · К).

15. Давление азота, находящегося в сосуде объёмом $V = 3$ л, после нагревания возросло на $\Delta p = 2,2$ МПа. Определите количество теплоты, сообщённое газу, а также работу, совершённую газом, и изменение его внутренней энергии.

16. В сосуде находится одноатомный газ при температуре $t = 17$ °C и давлении $p = 100$ кПа. Объём сосуда $V = 3$ л. Газ изохорно нагревают на $\Delta t = 100$ °C. Определите изменение внутренней энергии газа. Какое количество теплоты было передано газу в этом процессе?

17. Идеальный газ переводят изотермически из состояния *1* в состояние *2* ($V_2 < V_1$), затем его переводят изобарно в состояние *3* и возвращают изохорно в состояние *1*. Положительную или отрицательную работу совершает газ в каждом из процессов и целиком за цикл? Происходит ли теплообмен между газом и окружающей средой? Начертите график зависимости p от V.

18. Газ, занимающий объём $V_1 = 1$ л при давлении $p = 10^5$ Па, расширился изотермически до объёма $V_2 = 2$ л. Затем при этом объёме давление газа было уменьшено в 2 раза. В дальнейшем газ расширялся при постоянном давлении до объёма $V_3 = 4$ л. Начертите график зависимости p от V и, используя его, установите, при каком из перечисленных процессов газ совершил наибольшую работу.

19. Некоторое количество газа занимает объём $V_1 = 10$ л и находится под давлением $p_1 = 100$ кПа при температуре $T_1 = 300$ К. Затем газ был нагрет без изменения объёма до температуры $T_2 = 320$ К, а после этого нагрет при постоянном давлении до температуры $T_3 = 350$ К (рис. 5.23).

Найдите работу A, которую совершил газ, переходя из первоначального состояния *1* в состояние *3*.

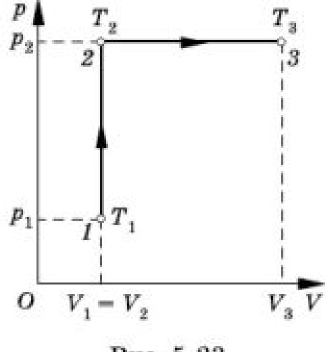


Рис. 5.23

20. Холодильник, потребляющий мощность W за время τ, охладил до 0 °С воду массой m при температуре t. Какое количество теплоты выделил холодильник в комнате за это время при условии, что теплоёмкостью холодильника можно пренебречь?

21. В идеальной тепловой машине газ отдал холодильнику 67% теплоты, полученной от нагревателя. Определите температуру T_2 холодильника, если температура нагревателя $T_1 = 430$ К.

22. Какую максимальную работу может совершить идеальный тепловой двигатель, если он в каждом цикле получает количество теплоты $Q_1 = 10^3$ Дж от нагревателя с температурой $T_1 = 1000$ К? Температура окружающей среды (холодильника) $T_2 = 293$ К.

23. Чтобы принять ванну, необходимо нагреть воду объёмом $V = 200$ л от температуры $t_1 = 7$ °С до температуры $t_2 = 47$ °С. Если такое количество теплоты сообщить идеальной тепловой машине, работающей при температуре нагревателя t_2 и температуре холодильника t_1, то с помощью этой машины можно поднять груз массой $m = 4{,}8 \cdot 10^4$ кг на высоту $H = 10$ м. Определите по этим данным удельную теплоёмкость воды. Плотность воды $\rho = 10^3$ кг/м³. Ускорение свободного падения $g \approx 10$ м/с².

---

1. Изобразите в виде схемы связь между понятиями «механическая энергия» и «внутренняя энергия».
2. Выполните проект «КПД человека».
3. Напишите эссе «Жизнь человека как необратимый процесс самореализации».
4. Напишите эссе «Моя жизнь: максимальный порядок или максимальный беспорядок?».
5. Подготовьте реферат «Тепловые двигатели: экологические проблемы, способы их решения разными странами (в том числе и Россией)».

6. Используя различные информационные источники (библиотеки, Интернет и т. д.), подготовьте аналитический доклад «Тепловые двигатели, окружающая среда, здоровье человека».
7. Назовите открытия в физике, которые сделали инженеры (не менее трёх). Как вы считаете, какие процессы в настоящее время являются более эффективными «от научных открытий к технологиям» или «от технологий к научным открытиям»? Проведите ретроспективный анализ (на примере России и других стран). Подготовьте дискуссию.
8. Подготовьте презентацию «Кондиционер: принцип действия, виды, стоимость, экологичность».
9. Теорема в физике и теорема в математике — это одно и то же или различное? Ответ аргументируйте на примере теоремы Карно.
10. Сформулируйте одну из важнейших технических задач. Каким образом в настоящее время эта задача решается в России, в других странах? Ответ представьте в виде презентации.

Глава 6

ВЗАИМНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Молекулярно-кинетическая теория позволяет не только понять, почему вещество может находиться в газообразном, жидком и твёрдом состояниях, но и объяснить процесс перехода вещества из одного состояния в другое.

§ 6.1. ИСПАРЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

При любой температуре молекулы жидкости частично покидают её поверхность. Происходит испарение жидкости.

Испарение

Повседневные наблюдения показывают, что количество воды, спирта, эфира, бензина, керосина и любой другой жидкости, содержащейся в открытом сосуде, постепенно уменьшается, а с течением времени жидкость и вовсе может исчезнуть. Например, хорошо закупоренный пузырёк с чернилами может стоять в шкафу сколь угодно долго, и количество чернил в нём не меняется. Если же пузырёк оставить открытым, то, заглянув в него через достаточно продолжительное время, мы увидим, что жидкости в нём нет.

В действительности жидкости бесследно не исчезают — они испаряются, т. е. превращаются в пар.

Те же наблюдения позволяют установить, что испарение происходит с поверхности жидкости при любой температу-

ре. Скорость испарения тем больше, чем больше площадь свободной поверхности жидкости, выше её температура и чем быстрее удаляются образовавшиеся над жидкостью пары. Поэтому, чтобы бельё быстрее высохло, его распрямляют, а не вешают скомканным. Бельё быстрее высыхает при более высокой температуре воздуха и на ветру. Испарение также ускоряется при уменьшении внешнего давления, вернее при уменьшении давления водяных паров, содержащихся в окружающей среде.

Скорость испарения различных жидкостей различна. Эфир испаряется быстрее бензина, а бензин быстрее спирта. Все эти три жидкости, называемые летучими, испаряются быстрее воды. Поэтому их следует содержать в хорошо закрывающихся сосудах. Ртуть — очень медленно испаряющаяся жидкость.

Молекулярная картина испарения

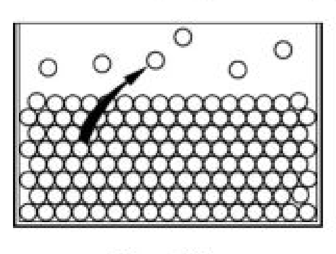


Рис. 6.1

Молекулы жидкости участвуют в хаотическом движении. При этом чем выше температура жидкости, тем интенсивнее движутся молекулы, тем больше их кинетическая энергия. Но средняя кинетическая энергия молекул имеет при заданной температуре определённое значение. У каждой молекулы энергия в данный момент может оказаться как меньше, так и больше средней. Кинетическая энергия некоторых молекул в какой-то момент может стать столь большой, что они окажутся способными вылететь из жидкости, преодолев силы притяжения остальных молекул (рис. 6.1). В этом и состоит процесс испарения.

Молекулярно-кинетическая теория позволяет объяснить условия, ускоряющие процесс испарения. Чем больше площадь свободной поверхности жидкости, тем больше число вылетающих молекул, тем быстрее происходит испарение.

Чем выше температура жидкости, тем большее число молекул обладает достаточной для вылета из жидкости кинетической энергией.

Конденсация пара



Вылетевшая с поверхности жидкости молекула принимает участие в хаотическом тепловом движении молекул пара. Беспорядочно двигаясь, она может навсегда удалиться от

поверхности жидкости в открытом сосуде, но может и вернуться снова в жидкость. Этот процесс превращения пара в жидкость, обратный процессу испарения, называют *конденсацией* (от лат. condensatio — уплотнение, сгущение). Если поток воздуха над сосудом (ветер) уносит с собой образовавшиеся пары жидкости, то жидкость испаряется быстрее, так как уменьшаются шансы молекулы пара вновь вернуться в жидкость.

Охлаждение при испарении

При испарении жидкость покидают молекулы, кинетическая энергия которых больше их средней кинетической энергии. Поэтому среднее значение кинетической энергии остающихся молекул жидкости уменьшается. А это означает понижение температуры испаряющейся жидкости. Вот почему вы чувствуете, что в жаркий летний день становится прохладно сразу после купания. Испарение воды с поверхности тела приводит к охлаждению его. Известно также, что в мокрой одежде холоднее, чем в сухой, особенно при ветре. Очень сильное охлаждение получается, если испарение происходит быстро. При быстром испарении эфира при атмосферном давлении может произойти охлаждение ниже 0 °С. Это можно обнаружить так. В вогнутое очковое стекло надо налить немного эфира и поставить его на стол, смоченный водой. При быстром испарении эфира (испарение ускоряют продуванием воздуха над эфиром) стёклышко примерзает к поверхности стола. Охлаждением при испарении летучих жидкостей пользуются врачи, когда нужно заморозить кожу больного, чтобы сделать её нечувствительной к боли.

В жарких странах для охлаждения воды её обычно содержат в пористых глиняных сосудах. Вода, просачивающаяся через поры сосуда, испаряется, охлаждая воду в сосуде.

Если лишить жидкость возможности испаряться, то охлаждение её будет происходить гораздо медленнее. Вспомните, как долго остывает жирный суп. Слой жира на его поверхности мешает выходу быстрых молекул воды. Жидкость почти не испаряется, и её температура падает медленно (сам жир испаряется крайне медленно, так как его большие молекулы более прочно сцеплены друг с другом, чем молекулы воды).

Испарение твёрдых тел

Испаряются не только жидкости, но и твёрдые тела. Молекулы, которые расположены у поверхности твёрдого тела и имеют достаточную кинетическую энергию, способ-

ны покинуть тело. Процесс перехода вещества из твёрдого состояния непосредственно в газообразное называется сублимацией или возгонкой.

Например, нафталин или камфара испаряются при комнатной температуре и нормальном давлении, минуя жидкое состояние. Точно так же испаряются кристаллы брома или иода, особенно если их подогреть. Испаряется также лёд. Если влажное бельё развесить на морозе, то вода замерзает, а затем лёд испаряется, и бельё высыхает.

При испарении жидкостей они охлаждаются, так как жидкость покидают наиболее быстрые молекулы.

? 1. Перечислите причины, от которых зависит скорость испарения жидкости.

2. Как влияет процесс испарения на температуру жидкости?

3.° В комнате находится открытый стакан с водой. Понижается ли со временем температура воды в стакане?

§ 6.2. РАВНОВЕСИЕ МЕЖДУ ЖИДКОСТЬЮ И ПАРОМ

Самое интересное состояние газа — это насыщенный пар. Он находится в равновесии с жидкостью.

Насыщенный пар

Количество жидкости в открытом сосуде вследствие испарения непрерывно уменьшается. Но если сосуд плотно закрыт, то этого не происходит, что можно объяснить следующим образом. В первый момент, после того как мы нальём жидкость в сосуд и закроем его, жидкость будет испаряться и плотность пара над жидкостью будет увеличиваться. Однако одновременно с этим будет расти и число молекул, возвращающихся в результате хаотического теплового движения обратно в жидкость. Чем больше плотность пара, тем большее число его молекул возвращается в жидкость. В открытом сосуде картина иная: покинувшие жидкость молекулы могут не возвращаться в жидкость.

В закрытом сосуде в конце концов устанавливается равновесное состояние: число молекул, покидающих поверхность жидкости, становится равным числу молекул пара, возвращающихся за то же время в жидкость. Такое равновесие называется динамическим или подвижным.

§ 6.3. ИЗОТЕРМЫ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

Для более детального выяснения условий, при которых возможны взаимные превращения газа и жидкости, недостаточно простых наблюдений за испарением жидкости. Нужно внимательно проследить за изменением давления реального газа в зависимости от его объёма при различных температурах.

Пусть в цилиндре под поршнем (рис. 6.3) находится углекислый газ. Будем его медленно сжимать, при этом мы совершаем над газом работу, вследствие чего внутренняя энергия газа должна увеличиваться. Если мы хотим провести процесс при постоянной температуре T, то нужно обеспечить хороший теплообмен между цилиндром и окружающей средой. Для этого можно поместить цилиндр в большой сосуд с жидкостью постоянной температуры (термостат) и сжимать газ настолько медленно, чтобы теплота успевала передаваться от газа к окружающим телам.

Проводя данный опыт, можно заметить, что вначале, когда объём достаточно велик ($V > V_2$, см. рис. 6.3), давление углекислого газа с уменьшением объёма растёт в соответствии с законом Бойля—Мариотта, а затем при дальнейшем увеличении давления наблюдаются небольшие отклонения

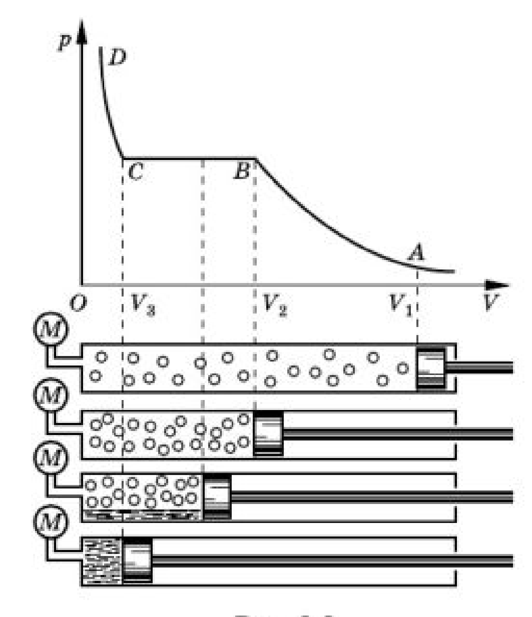


Рис. 6.3

от этого закона. Данная зависимость между давлением и объёмом газа изображена графически на рисунке 6.3 кривой AB.

При дальнейшем уменьшении объёма, начиная со значения V_2, давление в цилиндре под поршнем перестаёт меняться. Если заглянуть при этом в цилиндр через специальное смотровое окно, то можно увидеть, что часть объёма цилиндра занимает прозрачная жидкость. Это значит, что газ (пар) превратился в насыщенный пар, а часть его превратилась в жидкость, т. е. сконденсировалась.

Продолжая сжимать содержимое цилиндра, мы заметим, что количество жидкости в цилиндре увеличивается, а пространство, занятое насыщенным паром, уменьшается. Давление, которое показывает манометр, остаётся постоянным до тех пор, пока всё пространство под поршнем не окажется заполненным жидкостью. Этот процесс изображён на рисунке 6.3 участком BC графика.

В дальнейшем при незначительном уменьшении объёма, начиная со значения V_3, давление очень резко нарастает (участок CD графика; см. рис. 6.3). Это объясняется тем, что жидкости малосжимаемы.

Так как рассмотренный процесс происходил при постоянной температуре T, график $ABCD$ (см. рис. 6.3), изображающий зависимость давления газа p от объёма V, называют изотермой реального газа. Участок AB ($V > V_2$) соответствует ненасыщенному пару, участок BC ($V_3 < V < V_2$) — равновесному состоянию жидкости и её насыщенного пара, а участок CD ($V < V_3$) — жидкому состоянию вещества.

Опыты показывают, что такой же вид имеют изотермы и других веществ, если их температура не слишком велика.

Давление насыщенного пара

Что будет происходить с насыщенным паром, если уменьшать занимаемый им объём, например, если сжимать пар, находящийся в равновесии с жидкостью в цилиндре под поршнем, поддерживая температуру содержимого цилиндра постоянной?

При сжатии пара равновесие начнёт нарушаться. Плотность пара в первый момент немного увеличится, и из газа в жидкость начнёт переходить большее число молекул, чем из жидкости в газ. Это будет происходить до тех пор, пока вновь не установится динамическое равновесие и плотность пара, а значит, и концентрация его молекул не примут преж-

нее значение. Следовательно, **концентрация молекул насыщенного пара не зависит от его объёма при постоянной температуре.**

Состояние насыщенного пара приближённо описывается уравнением $p = nkT$, полученным нами для идеального газа (см. § 4.5). Для насыщенного пара эта формула выполняется тем точнее, чем ниже температура и соответственно давление пара.

Так как давление пропорционально концентрации молекул ($p = nkT$), то из независимости концентрации молекул (или плотности) насыщенных паров от объёма следует независимость давления насыщенного пара от занимаемого им объёма.

Не зависящее от объёма давление пара, при котором жидкость находится в равновесии со своим паром, называют *давлением насыщенного пара*.

При одной и той же температуре, как показывает опыт, давление насыщенного пара различных веществ различно. Например, при температуре 20 °C давление насыщенного пара эфира равно 440 мм рт. ст., насыщенного пара спирта — 45 мм рт. ст., а водяного насыщенного пара — 17 мм рт. ст.

Семейство изотерм реального газа

До сих пор мы рассматривали только одну определённую изотерму реального газа. Познакомимся теперь с тем, как будет вести себя, например, тот же углекислый газ при другой, более высокой (но также постоянной) температуре T_1. Новая изотерма, как и прежняя, довольно точно совпадает с изотермой идеального газа при больших объёмах. Начиная с некоторого объёма $V_1' < V_1$, она также идёт горизонтально (рис. 6.4). Наконец, при объёме $V_2' > V_2$ изотерма круто поднимается вверх. Это означает, что при объёме V_2' весь цилиндр заполнен жидкостью.

Если на основе опытных данных построить ещё несколько изотерм, получится семейство изотерм реального газа (см. рис. 6.4). При этом обнаружится закономерность, общая для всех газов. Во-первых, чем выше температура, тем меньше объём, при котором начинается конденсация газа (пара). Объясняется это тем, что молекулы при более высокой температуре движутся быстрее, и необходима бóльшая плотность газа для того, чтобы силы притяжения могли бы удержать молекулы друг около друга. Во-вторых, чем выше тем-

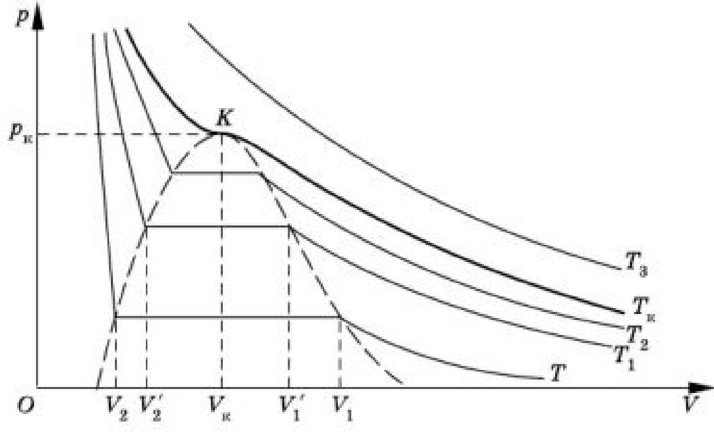


Рис. 6.4

пература, тем больше объём, занимаемый жидкостью после того, как весь газ конденсируется. Ведь объём жидкости с увеличением температуры растёт. Следовательно, длина прямолинейного горизонтального участка изотермы, соответствующего равновесию между жидкостью и насыщенным паром, с ростом температуры уменьшается. Конденсация начинается при бо́льших плотностях газа и заканчивается при меньших плотностях жидкости. Другими словами, плотность газа и жидкости при одном и том же давлении тем ближе друг к другу, чем выше температура.

Зависимость давления и плотности насыщенного пара от температуры

Знакомство с изотермами реального газа при различных температурах (см. рис. 6.4) позволяет сделать вывод о том, *что давление насыщенного пара возрастает с увеличением температуры*. Так как давление насыщенного пара не зависит от объёма, то, следовательно, оно зависит только от температуры. Однако зависимость $p(T)$, найденная экспериментально, не является пропорциональной, как у идеального газа при постоянном объёме (закон Шарля). С увеличением температуры давление насыщенного пара растёт быстрее, чем давление идеального газа (рис. 6.5, участок кривой AB). Это становится особенно очевидным, если провести изохору через точку A (пунктирная прямая). Почему это происходит?

При нагревании жидкости с паром в закрытом сосуде часть жидкости превращается в пар. С ростом температуры

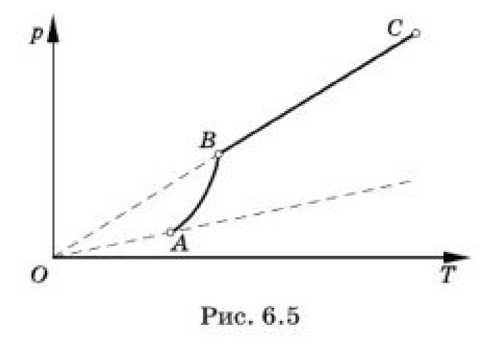


Рис. 6.5

увеличивается скорость испарения и равновесие между жидкостью и паром нарушается. Концентрация молекул, а следовательно, и плотность пара возрастают. Так продолжается до тех пор, пока плотность пара не увеличится настолько, что процесс конденсации уравновесит процесс испарения. В результате согласно формуле $p = nkT$ давление насыщенного пара растёт не только вследствие повышения температуры, но и вследствие увеличения концентрации молекул (плотности) пара. При этом главную роль в увеличении давления насыщенного пара играет рост концентрации молекул пара, а не повышение его температуры.

Основное различие в поведении идеального газа и насыщенного пара состоит в том, что при изменении температуры пара в закрытом сосуде (или при изменении объёма пара при постоянной температуре) меняется масса пара. Жидкость частично превращается в пар или, напротив, пар частично конденсируется. С идеальным газом ничего подобного не происходит.

Когда вся жидкость испарится, пар при дальнейшем нагревании перестанет быть насыщенным и его давление при постоянном объёме будет возрастать прямо пропорционально абсолютной температуре в соответствии с законом Шарля (см. рис. 6.5, участок BC).

Изотермы реального газа, полученные экспериментально, описывают состояние газа, равновесие между газом и жидкостью и жидкое состояние. С их помощью можно проследить за зависимостью давления насыщенного пара от температуры.

? 1. Каким образом строятся изотермы реального газа?

2. При каких условиях концентрация молекул насыщенного пара не зависит от его объёма?

3. Какое давление пара называют давлением насыщенного пара?
4. Какие закономерности обнаруживаются при построении семейства изотерм реального газа?
5. Как зависят давление и плотность насыщенного пара от температуры?

§ 6.4. КРИТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА. КРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

Вещество может находиться в жидком состоянии не при любой температуре. Есть предел.

Критическая температура

При достаточно высоких температурах горизонтальный участок изотермы реального газа (см. рис. 6.4) становится совсем коротким и при некоторой температуре обращается в точку (на рис. 6.4 — точка K). Эту температуру называют критической. **Критической называется температура, при которой исчезают различия в физических свойствах между жидкостью и паром, находящимся с ней в динамическом равновесии.** Каждое вещество имеет свою критическую температуру. Например, критическая температура для углекислоты CO_2 равна $t_к = 31$ °C, а для воды — $t_к = 374$ °C.

Критическое состояние

Состояние, соответствующее точке K, в которую обращается горизонтальный участок изотермы при температуре $T = T_к$, называют критическим состоянием (критическая точка). Давление и объём в этом состоянии называют критическими. Критическое давление для углекислого газа равно $7{,}4 \cdot 10^6$ Па (73 атм), а для воды $2{,}2 \cdot 10^7$ Па (218 атм). *В критическом состоянии жидкость имеет максимальный объём, а насыщенный пар — максимальное давление.*

Плотность жидкости и её насыщенного пара при критической температуре

Мы уже отмечали, что при увеличении температуры возрастает плотность насыщенного пара (см. § 6.3). Плотность жидкости, находящейся в равновесии со своим паром, наобо-

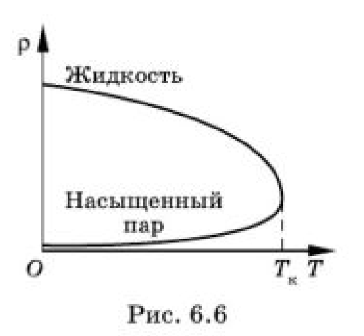


Рис. 6.6

Таблица 2

Температура, °С	Плотность, кг/м^3	
	воды	пара
15	1000	0,073
50	998	0,083
100	960	0,597
200	860	7,84
300	700	46,9
374	320	320

рот, уменьшается вследствие её расширения при нагревании. В таблице 2 приведены значения плотности воды и её насыщенного пара для разных температур.

Если на одном рисунке начертить кривые зависимости плотности жидкости и её насыщенного пара от температуры, то для жидкости кривая пойдёт вниз, а для пара — вверх (рис. 6.6). При критической температуре обе кривые сливаются, т. е. плотность жидкости становится равной плотности пара. Различие между жидкостью и паром исчезает.

Газ и пар

Мы много раз употребляли слова «газ» и «пар». Эти термины возникли в те времена, когда считалось, что пар может быть превращён в жидкость, а газ нет. После того как все газы были сконденсированы (см. § 6.7), для такой двойственной терминологии не осталось оснований. Пар и газ — это одно и то же, между ними принципиальной разницы нет. Когда говорят о паре какой-нибудь жидкости, то обычно имеют в виду, что его температура меньше критической и сжатием его можно превратить в жидкость. Только по привычке мы говорим о водяном паре, а не о водяном газе, о насыщенном паре, а не о насыщенном газе и т. д.

Экспериментальное исследование критического состояния

Эксперименты по изучению критического состояния выполнил в 1863 г. русский учёный М. П. Авенариус. Прибор, с помощью которого можно наблюдать критическое состояние (прибор Авенариуса), состоит из воздушной ванны (рис. 6.7) и находящейся внутри ванны запаянной стеклян-

ной трубочки (ампулы) с жидким эфиром. Объём ампулы (её вместимость) равен критическому объёму эфира, налитого в трубочку. Пространство над эфиром в ампуле заполнено насыщенным паром эфира.

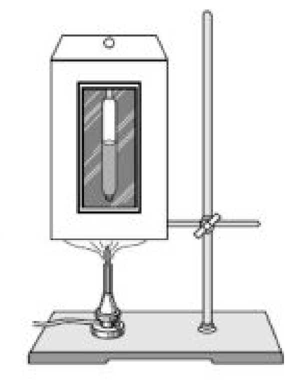


Рис. 6.7

При помощи газовой горелки или другого нагревателя воздушную ванну подогревают. За состоянием эфира наблюдают через стеклянное окошко в приборе.

При комнатной температуре можно отчётливо видеть границу между жидкостью и паром (рис. 6.8, *а*). По мере приближения к критической температуре объём жидкого эфира увеличивается, а граница раздела жидкость — пар становится слабовыраженной, неустойчивой (рис. 6.8, *б*).

При подходе к критическому состоянию граница между ними исчезает совсем (рис. 6.8, *в*).

При охлаждении появляется плотный туман, заполняющий всю трубочку (рис. 6.8, *г*). Это образуются капельки жидкости. Далее они сливаются вместе, и опять возникает граница раздела между жидкостью и паром (рис. 6.8, *д*).

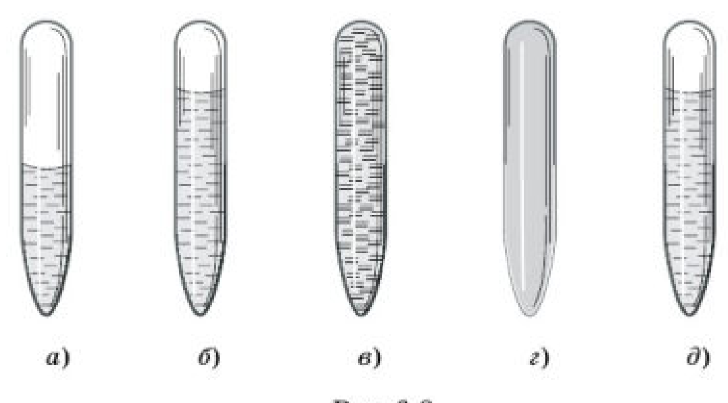


Рис. 6.8

Для опыта выбран эфир, так как он имеет сравнительно низкое критическое давление (около 36 атм). Критическая температура его тоже невелика: 194 °C.

Если сжимать газ, поддерживая его температуру выше критической (см. рис. 6.4, изотерма T_3), причём, как и рань-

ше, начать с очень больших объёмов, то уменьшение объёма приведёт к возрастанию давления в соответствии с уравнением состояния идеального газа. Однако если при температуре ниже критической при определённом давлении происходила конденсация пара, то теперь образования жидкости в сосуде наблюдаться не будет. При температуре выше критической газ нельзя обратить в жидкость ни при каких давлениях.

В этом и состоит основное значение понятия критической температуры.

Диаграмма равновесных состояний газа и жидкости

Ещё раз вернёмся к рисунку 6.4, на котором изображены изотермы реального газа. Соединим все левые концы горизонтальных участков изотерм, т. е. те точки, которые соответствуют окончанию конденсации насыщенного пара и началу сжатия жидкости. Получится плавная кривая, оканчивающаяся в критической точке K. На рисунке 6.9 это кривая AK. Слева от кривой AK, между ней и критической изотермой (участок изотермы CK), расположена область, соответствующая жидкому состоянию вещества (на рис. 6.9 эта область выделена горизонтальной штриховкой). Каждой точке этой области соответствуют параметры p, V и T, характеризующие жидкость в состоянии теплового равновесия.

Соединим теперь плавной кривой все правые концы горизонтальных участков изотерм. Эта кривая на рисунке 6.9 тоже заканчивается в точке K. Две линии AK и BK ограничивают область, каждая точка которой соответствует состоя-

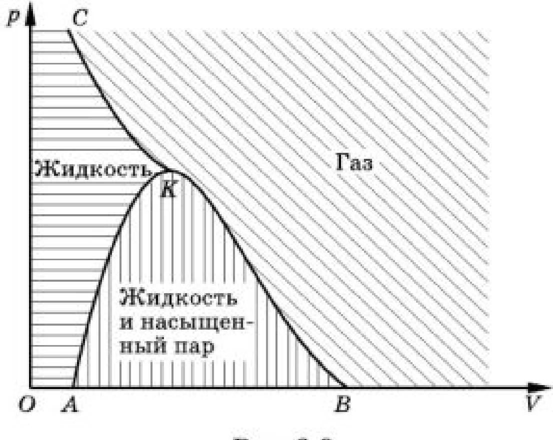


Рис. 6.9

нию равновесия между жидкостью и насыщенным паром (на рис. 6.9 эта область выделена вертикальной штриховкой). За исключением области жидкого состояния и области равновесия жидкости с газом, вся остальная область соответствует газообразному состоянию вещества. На рисунке 6.9 она выделена косой штриховкой.

В результате получилась диаграмма равновесных состояний газа и жидкости. Каждой точке на этой диаграмме соответствует определённое состояние системы: газ, жидкость или равновесие между жидкостью и газом.

При критической температуре свойства жидкости и насыщенного пара становятся неразличимыми. Выше критической температуры жидкость не может существовать.

? 1. Что такое критическая температура?
2. Почему для одного и того же агрегатного состояния существует два термина — «газ» и «пар»?
3. Какова основная идея экспериментов по изучению критического состояния?

§ 6.5. КИПЕНИЕ

Жидкость не только испаряется. При некоторой температуре она кипит. Что такое кипение и чем определяется температура кипения?

Нальём в стеклянную колбу воду и станем её нагревать. Скоро дно и стенки колбы покроются пузырьками. Появление этих пузырьков объясняется выделением воздуха, растворённого в воде. В воде (а также в любой другой жидкости) всегда имеется некоторое количество растворённого воздуха. Этим воздухом дышат рыбы и другие живые существа, обитающие в воде. Чаще всего пузырьки зарождаются в маленьких трещинках на дне сосуда. Так как внутри каждого пузырька происходит испарение воды, то, кроме воздуха, пузырьки содержат насыщенные пары воды.

При повышении температуры пузырьки, заполненные воздухом и паром, увеличиваются в размерах и становятся многочисленнее.

Проследим за ростом одного из пузырьков, образовавшегося на дне сосуда. Когда пузырёк сделается достаточно боль-

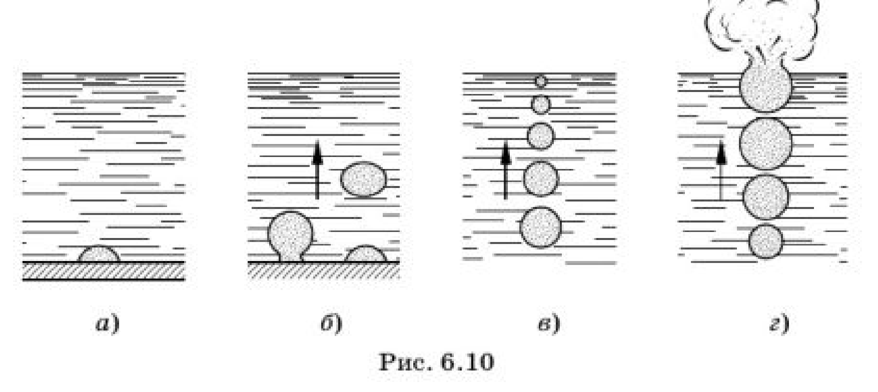


Рис. 6.10

шим (рис. 6.10, *а*), действующая на него выталкивающая (архимедова) сила со стороны воды заставляет его оторваться, подобно тому как отрывается слишком тяжёлая капля воды, повисшая на крыше. При этом между пузырьком и дном сосуда образуется всё суживающаяся воздушная перемычка (рис. 6.10, *б*), и наконец пузырёк отрывается, оставляя у дна небольшое количество воздуха, из которого с течением времени разовьётся новый пузырёк. Поднимающийся пузырёк, попадая в верхние, более холодные слои воды, уменьшается в размере, так как содержащийся в нём пар конденсируется (рис. 6.10, *в*). Давление стремительно падает, и пузырёк захлопывается. Захлопывание происходит настолько быстро, что стенки пузырька, сталкиваясь, производят нечто вроде маленького взрыва. Множество таких микровзрывов создаёт характерный шум. Закипающая вода шумит. Другой, менее существенной причиной шума являются колебания жидкости, возникающие при отрыве пузырьков от дна сосуда.

Наконец, когда вся вода достаточно прогреется, поднимающиеся пузырьки уже не будут уменьшаться в размерах и достигают поверхности, выбрасывая пар во внешнее пространство (рис. 6.10, *г*). Шум при этом прекращается и начинается «бульканье» — вода закипела.

Таким образом, *кипение — это переход жидкости в пар, происходящий с образованием пузырьков пара по всему объёму жидкости или на поверхности сосуда.* Термометр, помещённый в пар над кипящей водой, всё время, пока вода кипит, показывает одну и ту же температуру (около 100 °C). Эта температура не изменится, пока вся вода не выкипит.

Очевидно, при кипении давление паров*, образующихся внутри пузырьков у дна сосуда, таково, что пузырьки могут расширяться, преодолевая атмосферное давление, а также давление столба воды. Таким образом, **кипение происходит при такой температуре, когда давление насыщенных паров сравнивается с давлением внутри жидкости.** Температура кипения определяется, следовательно, давлением насыщенного пара, а значит, его температурой. Температура пара кипящей жидкости и есть температура кипения.

Зависимость температуры кипения жидкости от давления

Из приведённых рассуждений ясно, что температура кипения жидкости должна зависеть от внешнего давления. Наблюдения подтверждают это.

Чем больше внешнее давление, тем выше температура кипения. Так, в паровом котле при давлении, достигающем $1{,}6 \cdot 10^6$ Па, вода не кипит и при температуре 200 °С. В медицинских учреждениях кипение воды в герметически закрытых сосудах — автоклавах (рис. 6.11) также происходит при повышенном давлении. Поэтому температура кипения значительно выше 100 °С. Автоклавы применяют для стерилизации хирургических инструментов, перевязочного материала и т. д.

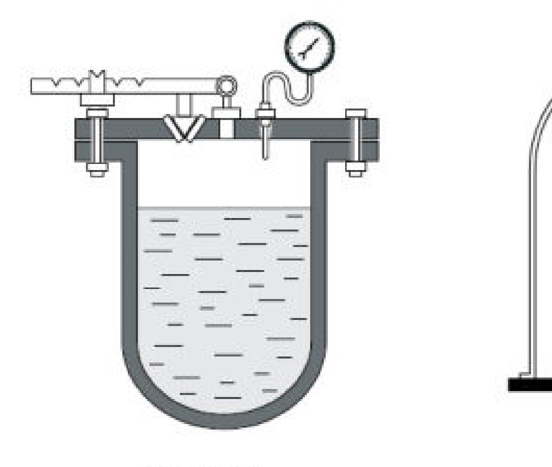




Рис. 6.11

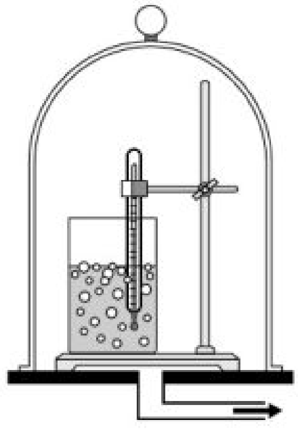


Рис. 6.12

* Давление воздуха внутри пузырьков очень мало, поэтому им можно пренебречь. Главную роль играет давление пара внутри пузырьков.

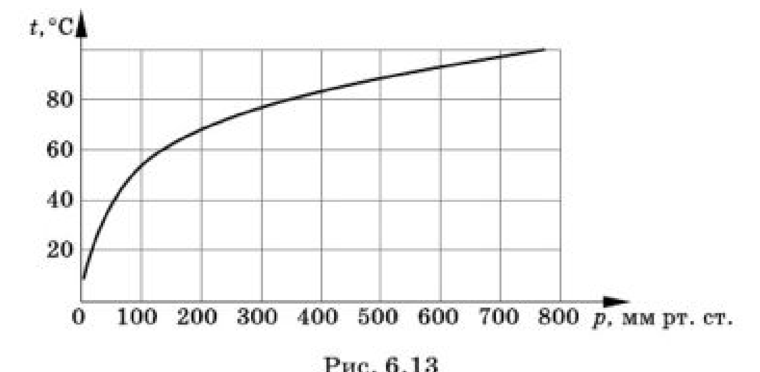


Рис. 6.13

И наоборот, уменьшая внешнее давление, мы тем самым понижаем температуру кипения. Под колоколом воздушного насоса можно заставить воду кипеть при комнатной температуре (рис. 6.12). При подъёме в горы атмосферное давление уменьшается, поэтому уменьшается температура кипения. На высоте 7134 м (пик Ленина на Памире) давление приближённо равно $4 \cdot 10^4$ Па (300 мм рт. ст.). Вода кипит там примерно при 70 °С. Сварить, например, мясо в этих условиях невозможно.

На рисунке 6.13 изображена кривая зависимости температуры кипения воды от внешнего давления. Легко сообразить, что эта кривая является одновременно и кривой, выражающей зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры.

Различие температур кипения жидкостей

У каждой жидкости своя температура кипения. Различие температур кипения жидкостей определяется различием в давлении их насыщенных паров при одной и той же температуре. Например, пары эфира уже при комнатной температуре имеют давление, большее половины атмосферного. Поэтому, чтобы давление паров эфира стало равным атмосферному, нужно небольшое повышение температуры (до 35 °С). У ртути же насыщенные пары имеют при комнатной температуре совсем ничтожное давление. Давление паров ртути делается равным атмосферному только при значительном повышении температуры (до 357 °С). Именно при этой температуре, если внешнее давление равно 10^5 Па, и кипит ртуть.

Различие температур кипения веществ находит большое применение в технике, например при разделении нефтепро-

дуктов. При нагревании нефти раньше всего испаряются наиболее ценные, летучие её части (бензин), которые можно таким образом отделить от «тяжёлых» остатков (масел, мазута).

Жидкость закипает, когда давление её насыщенного пара сравнивается с давлением внутри жидкости.



? 1. Опишите механизм кипения жидкости.
2. Чем объясняется различие температур кипения жидкостей?
3. Почему понятие «давление насыщенного пара» является ключевым при исследовании процесса кипения жидкости?

§ 6.6. ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ

Требуется ли энергия для превращения жидкости в пар? Скорее всего да! Не так ли?

Мы отмечали (см. § 6.1), что испарение жидкости сопровождается её охлаждением. Для поддержания температуры испаряющейся жидкости неизменной к ней необходимо подводить извне теплоту. Конечно, теплота и сама может передаваться жидкости от окружающих тел. Так, вода в стакане испаряется, но температура воды, несколько более низкая, чем температура окружающего воздуха, остаётся неизменной. Теплота передаётся от воздуха к воде до тех пор, пока вся вода не испарится.

Чтобы поддерживать кипение воды (или иной жидкости), к ней тоже нужно непрерывно подводить теплоту, например подогревать её горелкой. При этом температура воды и сосуда не повышается, но каждую секунду образуется определённое количество пара.

Таким образом, для превращения жидкости в пар путём испарения или путём кипения требуется приток теплоты. **Количество теплоты, требующееся для превращения данной массы жидкости в пар той же температуры, называется теплотой парообразования этой жидкости.**

На что расходуется подводимая к телу энергия? Прежде всего на увеличение его внутренней энергии при переходе из жидкого состояния в газообразное: ведь при этом увеличивается объём вещества от объёма жидкости до объёма насыщенного пара. Следовательно, увеличивается среднее расстояние между молекулами, а значит, и их потенциальная энергия.

Кроме того, при увеличении объёма вещества совершается работа против сил внешнего давления. Эта часть теплоты парообразования при комнатной температуре составляет обычно несколько процентов всей теплоты парообразования.

Теплота парообразования зависит от рода жидкости, её массы и температуры. Зависимость теплоты парообразования от рода жидкости характеризуется величиной, называемой удельной теплотой парообразования.

Удельной теплотой парообразования данной жидкости называется отношение теплоты парообразования жидкости к её массе:

$$r = \frac{Q_п}{m}, \qquad (6.6.1)$$

где r — удельная теплота парообразования жидкости; m — масса жидкости; $Q_п$ — её теплота парообразования. Единицей удельной теплоты парообразования в СИ является джоуль на килограмм (Дж/кг).

Удельная теплота парообразования воды очень велика: $2{,}256 \cdot 10^6$ Дж/кг при температуре 100 °С. У других жидкостей (спирт, эфир, ртуть, керосин и др.) удельная теплота парообразования меньше в 3—10 раз.

Зависимость удельной теплоты парообразования от температуры

Для одной и той же жидкости удельная теплота парообразования при разных температурах имеет разное значение. При повышении температуры удельная теплота парообразования уменьшается, так как с ростом температуры уменьшается разность между объёмом жидкости и объёмом её насыщенного пара. Поэтому уменьшается изменение внутренней энергии и работа против сил внешнего давления.

Значения удельной теплоты парообразования воды при разных температурах приведены в таблице 3.

Таблица 3

Температура, °С	Удельная теплота парообразования, МДж/кг	Температура, °С	Удельная теплота парообразования, МДж/кг
0	2,45	250	1,71
50	2,38	300	1,38
100	2,26	350	0,88
150	2,12	374	0
200	1,96		

§ 6.7. СЖИЖЕНИЕ ГАЗОВ

Любой газ можно превратить в жидкость простым сжатием, если только его температура ниже критической. Поэтому деление веществ на жидкости и газы в значительной мере условно. Те вещества, которые мы привыкли считать газами, просто имеют очень низкие критические температуры и поэтому при температуре, близкой к комнатной, не могут находиться в жидком состоянии. Наоборот, у веществ, причисляемых нами к жидкостям, критические температуры велики.

Первый газ (аммиак) был обращён в жидкость уже в 1799 г. Дальнейшие успехи в сжижении газов связаны с именем английского физика М. Фарадея (1791—1867), который сжижал газы путём их одновременного охлаждения и сжатия.

Ко второй половине XIX в. из всех известных в то время газов остались не обращёнными в жидкость только шесть: водород, кислород, азот, оксид азота, оксид углерода и метан, — их назвали постоянными газами. Задержка в сжижении этих газов ещё на четверть столетия произошла потому, что техника понижения температуры была развита слабо и они не могли быть охлаждены до температуры ниже критической. Когда физики научились получать температуры порядка 1 К, удалось все газы, в том числе и гелий, обратить не только в жидкое, но и в твёрдое состояние.

Установки для сжижения газов

Существует много типов машин для получения жидких газов, в частности жидкого воздуха. В современных промышленных установках значительное охлаждение достигается путём расширения газа в условиях теплоизоляции (адиабатное расширение).

Такие машины называют детандерами (расширителями). Расширяющийся газ совершает работу, перемещая поршень (поршневые детандеры) или вращая турбину (турбинные детандеры), за счёт своей внутренней энергии и поэтому охлаждается.

Высокопроизводительные турбодетандеры низкого давления были разработаны академиком П. Л. Капицей. Начиная с 50-х гг. все крупные установки в мире для сжижения воздуха работают по схеме Капицы.

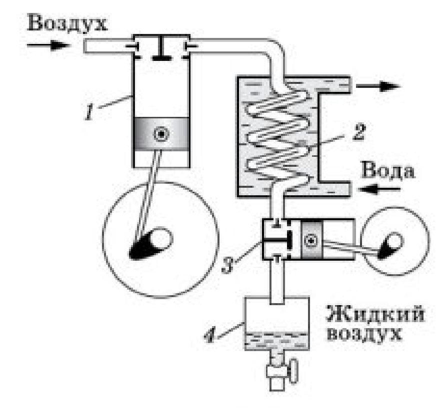


Рис. 6.14

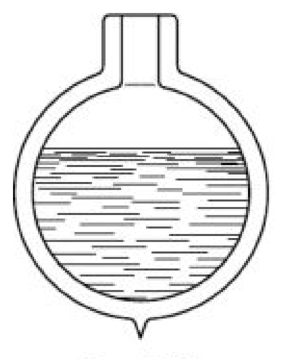
На рисунке 6.14 приведена упрощённая схема поршневого детандера. Атмосферный воздух поступает в компрессор *1*, где сжимается до давления в несколько десятков атмосфер. Нагретый при сжатии воздух охлаждается в теплообменнике *2* проточной водой и поступает в цилиндр детандера *3*. Здесь он, расширяясь, совершает работу, толкая поршень, и охлаждается настолько сильно, что конденсируется в жидкость. Сжиженный воздух поступает в сосуд *4*.

Температура кипения жидкого воздуха очень низка. При атмосферном давлении она составляет –193 °C. Поэтому жидкий воздух в открытом сосуде, когда давление его паров равно атмосферному давлению, кипит. Так как окружающие тела значительно теплее, то приток теплоты к жидкому воздуху, если бы он хранился в обычных сосудах, был бы настолько значителен, что за очень короткий срок весь жидкий воздух испарился бы.



Капица Пётр Леонидович (1894—1984) — знаменитый советский физик; лауреат Нобелевской премии; ученик Э. Резерфорда.

Капица открыл сверхтекучесть жидкого гелия, разработал новые промышленные методы сжижения газов. Большое значение имеют работы Капицы по созданию сверхсильных магнитных полей и электронных генераторов больших мощностей.


Рис. 6.15

Хранение жидких газов

Чтобы сохранить воздух в жидком состоянии, надо воспрепятствовать его теплообмену с окружающей средой. С этой целью жидкий воздух (и другие жидкие газы) помещают в особые сосуды, называемые сосудами Дьюара. Сосуд Дьюара устроен так же, как и обычный термос. Он имеет двойные стеклянные стенки, из пространства между которыми выкачан воздух (рис. 6.15). Это уменьшает теплопроводность сосуда. Внутреннюю стенку делают блестящей (посеребрённой) для уменьшения нагревания излучением. У сосудов Дьюара узкое горлышко, при хранении в них сжиженных газов их оставляют открытыми, чтобы содержащийся в сосуде газ имел возможность постепенно испаряться. Благодаря затрате теплоты на испарение сжиженный газ остаётся всё время холодным. В хорошем сосуде Дьюара жидкий воздух сохраняется в течение нескольких недель.

Применение сжиженных газов

Сжижение газов имеет техническое и научное значение. Сжижение воздуха используется в технике для разделения воздуха на составные части. Метод основан на том, что различные газы, из которых воздух состоит, кипят при различных температурах. Наиболее низкие температуры кипения имеют гелий, неон, азот, аргон. У кислорода температура кипения несколько выше, чем у аргона. Поэтому сначала испаряется гелий, неон, азот, а затем аргон, кислород.

Сжиженные газы находят широкое применение в технике. Азот идёт для получения аммиака и азотных солей, употребляемых в сельском хозяйстве для удобрения почвы. Аргон, неон и другие инертные газы используются для наполнения электрических ламп накаливания, а также газосветных ламп. Наибольшее применение имеет кислород. В смеси с ацетиленом или водородом он даёт пламя очень высокой температуры, применяемое для резки и сварки металлов. Вдувание кислорода (кислородное дутьё) ускоряет металлургические процессы. Доставляемый из аптек в подушках кислород облегчает страдания больных. Особенно важным является применение жидкого кислорода в качестве окислителя для двигателей космических ракет. Двига-

тели ракеты-носителя, поднявшей в космос первого космонавта Ю. А. Гагарина, работали на жидком кислороде.

Жидкий водород используется как топливо в космических ракетах. Например, для заправки американской ракеты «Сатурн-5» требуется 90 т жидкого водорода.

Газы, применяемые в промышленности, медицине и т. п., легче перевозить, когда они находятся в сжиженном состоянии, так как при этом в том же объёме заключается большее количество вещества. Так доставляют в стальных баллонах жидкую углекислоту на заводы газированных вод.

Жидкий аммиак нашёл широкое применение в холодильниках — огромных складах, где хранятся скоропортящиеся продукты. Охлаждение, возникающее при испарении сжиженных газов, используют в рефрижераторах при перевозке скоропортящихся продуктов.

Значение сжижения газов для научных исследований

Превращение всех газов в жидкое состояние лишний раз подтвердило единство в строении веществ. Оно показало, что состояние вещества зависит от его температуры и давления, а не определено раз и навсегда для данного тела.

С другой стороны, достигнутые при сжижении газов низкие температуры широко раздвинули границы научных исследований и позволили обнаружить изменение многих свойств веществ при сверхнизких температурах. Упругие тела, сделанные из каучука, становятся при этих температурах хрупкими, как стекло. Кусок резины после охлаждения в жидком воздухе легко ломается, а резиновый мячик при ударе разбивается вдребезги. Ртуть и цинк при низких температурах делаются ковкими, а свинец — пластический металл — упругим, как сталь. Колокольчик, сделанный из свинца, звенит. Очень многие вещества (спирт, яичная скорлупа и др.) после освещения их белым светом создают собственное излучение различного цвета (преимущественно зелёно-жёлтого).

При низких температурах интенсивность теплового движения резко уменьшается, поэтому оказывается возможным наблюдение целого ряда явлений, скрытых при более высоких температурах тепловым движением молекул.

При температурах, близких к абсолютному нулю, сильно изменяются электрические свойства некоторых металлов и сплавов: их сопротивление электрическому току становится равным нулю. Это явление, называемое сверхпрово-

димостью, открыто Г. Камерлинг-Оннесом в 1911 г. При температуре 2,2 К в жидком гелии исчезает вязкость, т. е. он приобретает свойство сверхтекучести. Сверхтекучесть открыл П. Л. Капица в 1938 г.

Такие газы, как азот, кислород, водород, гелий, могут находиться в жидком состоянии только при очень низких температурах. При таких температурах обнаруживаются особые свойства веществ, маскируемые в обычных условиях тепловым движением молекул. Эти свойства находят применение как в науке, так и в технике.

? Каким образом доказать, что состояние вещества зависит от его температуры и давления? Ответ представьте в виде схемы.

§ 6.8. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Водяной пар в воздухе, несмотря на огромные поверхности океанов, морей, озёр и рек, не является насыщенным: атмосфера — «открытый сосуд». Перемещение воздушных масс приводит к тому, что в одних местах нашей планеты в данный момент испарение воды преобладает над конденсацией, а в других, наоборот, преобладает конденсация.
Содержание водяного пара в воздухе — его влажность — характеризуется рядом величин.

Парциальное давление водяного пара

Атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов и водяного пара. Каждый из газов вносит свой вклад в суммарное давление, производимое воздухом на находящиеся в нём тела. **Давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали, называют парциальным давлением (или упругостью) водяного пара.** Парциальное давление p водяного пара принимают за один из показателей влажности воздуха. Его выражают в единицах давления — паскалях или миллиметрах ртутного столба.

Абсолютная влажность

За характеристику влажности воздуха может быть принята плотность водяного пара ρ*, содержащегося в воздухе.* Эту величину называют абсолютной влажностью



и из-за её малости выражают в граммах на кубический метр. Абсолютная влажность, таким образом, показывает, сколько водяного пара в граммах содержится в 1 м^3 воздуха.

Абсолютная влажность и парциальное давление водяного пара связаны уравнением Менделеева—Клапейрона

$$p = \frac{1}{M}\frac{m}{V}RT \text{ или } p = \frac{\rho}{M}RT. \qquad (6.8.1)$$

Относительная влажность

Знание парциального давления (упругости) водяного пара или абсолютной влажности ничего не говорит о том, насколько водяной пар в данных условиях далёк от насыщения. А именно от этого зависит интенсивность испарения воды (или конденсация пара) и, следовательно, потеря влаги живыми организмами. От этого же зависит быстрота высыхания тканей, почвы, увядание растений и многое другое. Вот почему вводят величину, показывающую, насколько водяной пар при данной температуре близок к насыщению, — относительную влажность.

Относительной влажностью воздуха φ называют выраженное в процентах отношение парциального давления *p* водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению p_0 насыщенного пара при той же температуре:

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%. \qquad (6.8.2)$$

Воспользовавшись уравнением (6.8.1), можно для относительной влажности получить ещё одну формулу:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\%, \qquad (6.8.3)$$

где ρ — абсолютная влажность, а ρ_0 — плотность насыщенного водяного пара при данной температуре.

Итак, для вычисления относительной влажности надо знать парциальное давление или плотность пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, и давление или плотность насыщенного водяного пара при этой же температуре.

Давление и плотность насыщенного водяного пара при разных температурах можно найти, воспользовавшись специальными таблицами, которые имеются в справочниках или задачниках по физике. А как определить парциальное

давление и плотность водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре? Ответить на этот вопрос можно различными способами.

Точка росы



При охлаждении влажного воздуха при постоянном давлении его относительная влажность повышается, так как чем ниже температура, тем ближе парциальное давление пара в воздухе к давлению насыщенного пара. В конце концов пар становится насыщенным. Это легко понять, если посмотреть на график зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры (рис. 6.16).

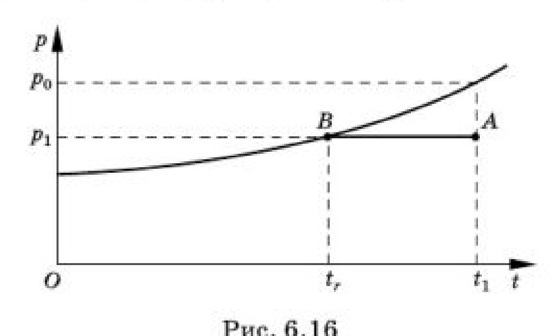


Рис. 6.16

Пусть при температуре t_1 парциальное давление водяного пара равно p_1. Состояние пара изобразится при этом точкой A. Если охладить воздух до температуры t_r при $p_1 = \text{const}$, то пар станет насыщенным и его состояние изобразится точкой B.

Температура t_r, до которой должен охладиться воздух, чтобы находящийся в нём водяной пар достиг состояния насыщения (при данной влажности воздуха и неизменном давлении), называется точкой росы.

Давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха, равной точке росы, и есть парциальное давление водяного пара, содержащегося в атмосфере.

При охлаждении воздуха до точки росы начинается конденсация паров: появляется туман, выпадает роса.

Точка росы также характеризует влажность воздуха, так как она позволяет определить парциальное давление водяного пара и абсолютную влажность с помощью таблиц, в которых представлена зависимость давления и плотности насыщенного водяного пара от температуры (о них мы уже говорили).

Гигрометр

Точку росы определяют с помощью прибора, называемого **конденсационным гигрометром**. Внешний вид этого прибора показан на рисунке 6.17, *а*, а его разрез — на рисунке 6.17, *б*. Гигрометр представляет собой металлическую коробку *1*, передняя стенка *2* которой хорошо отполирована. Коробка окружена полированным кольцом *3*, отделённым от неё теплоизолирующей прокладкой *4*. Коробка соединена с резиновой грушей *5*. Внутрь коробки наливают легко испаряющуюся жидкость — эфир и вставляют термометр. Продувая через коробку воздух с помощью груши, вызывают сильное испарение эфира и быстрое охлаждение коробки. По термометру замечают температуру, при которой появляются капельки росы на полированной поверхности стенки *2*. Это и есть точка росы, так как появление росы указывает, что водяной пар стал насыщенным.

Определение точки росы — наиболее точный способ измерения относительной влажности.

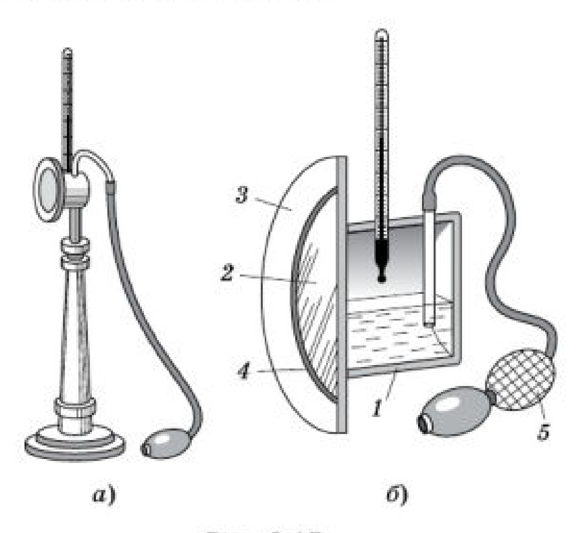


Рис. 6.17

Волосной гигрометр

Действие гигрометра другого типа — **волосного** — основано на свойстве обезжиренного человеческого волоса удлиняться при увеличении относительной влажности. При помощи волосного гигрометра можно непосредственно измерять относительную влажность воздуха. Его устройство по-



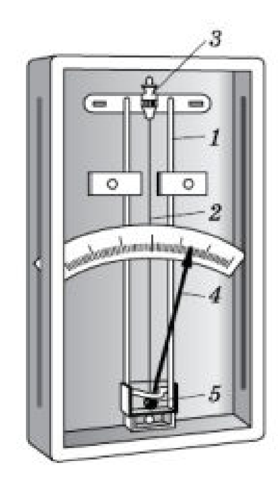


Рис. 6.18

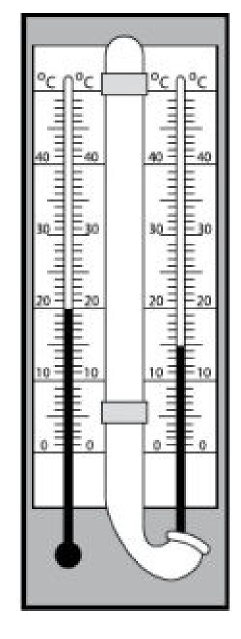


Рис. 6.19

казано на рисунке 6.18. Между двумя металлическими стойками *1* укреплён обезжиренный человеческий волос *2*. Один конец волоса закреплён на верхнем штифте, которым можно с помощью гайки *3* регулировать натяжение волоса. Другой конец волоса нагружен небольшой гирькой и перекинут через блок *5*, на котором укреплена стрелка *4* с противовесом. При изменении влажности воздуха длина волоса изменяется (увеличивается при увеличении влажности и уменьшается при её уменьшении), и стрелка по шкале указывает относительную влажность воздуха в процентах.

Волосной гигрометр применяют в тех случаях, когда в определении влажности воздуха не требуется большой точности.

Психрометр

Психрометр* состоит из двух термометров (рис. 6.19). Резервуар одного из них остаётся сухим, и термометр показывает температуру воздуха. Резервуар другого окружён полоской ткани, конец которой опущен в воду. Вода испаряет-

---

* От греческих слов psychrós — «холодный» и metréo — «измеряю».

ся, и благодаря этому термометр охлаждается. Чем больше относительная влажность, тем менее интенсивно идёт испарение и тем меньше разность показаний термометра, окружённого полоской влажной ткани, и сухого термометра. При относительной влажности, равной 100%, вода вообще не будет испаряться и показания обоих термометров будут одинаковы. По разности температур термометров с помощью специальных таблиц, называемых психрометрическими, можно определить относительную влажность воздуха. Психрометрами обычно пользуются в тех случаях, когда требуется достаточно точное и быстрое определение влажности воздуха.

Значение влажности

Люди весьма восприимчивы к влажности. От неё зависит интенсивность испарения влаги с поверхности кожи. При высокой влажности, особенно в жаркий день, испарение влаги с поверхности кожи уменьшается и поэтому затрудняется терморегуляция человеческого организма. В сухом воздухе, напротив, происходит быстрое испарение влаги с поверхности кожи, что приводит к высыханию слизистых оболочек дыхательных путей. Наиболее благоприятной для человека является относительная влажность от 40 до 60%. Такая влажность, например, поддерживается в космических кораблях.

Большое значение имеет знание влажности в метеорологии для предсказания погоды. Хотя количество водяного пара в атмосфере сравнительно невелико (около 1%), роль его в атмосферных явлениях значительна. Конденсация водяного пара приводит к образованию облаков и последующему выпадению осадков. При этом выделяется большое количество теплоты. Испарение воды и образование водяного пара сопровождается, наоборот, поглощением теплоты.

Определённую влажность необходимо поддерживать в ткацком, кондитерском, табачном и других производствах для нормального течения процесса, а также при хранении произведений искусства и книг в библиотеках и музеях. Поэтому в музеях на стенах вы можете увидеть психрометры.

Важное значение для человека наряду с температурой и давлением атмосферы имеет количество в ней водяных паров. Содержание водяного пара в воздухе характеризуется абсолютной и относительной влажностью.

? Какие параметры характеризуют содержание водяного пара в воздухе? Дайте их определения.

§ 6.9. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач по этой теме надо иметь в виду, что давление и плотность насыщенного пара не зависят от объёма, а зависят только от температуры.

Давление насыщенного пара считается известной величиной (сообщается в условии задачи или находится в соответствующих таблицах).

Уравнение состояния идеального газа вдали от критической температуры приближённо применимо для описания насыщенного пара. Но при сжатии или нагревании насыщенного пара его масса изменяется.

Задача 1

В замкнутом сосуде объёмом $V = 1$ м³ находится вода массой $m = 12$ г и насыщенный пар; плотность и давление пара при данной температуре равны соответственно $\rho = 8 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ и $p = 1,1$ кПа. Какое давление установится при увеличении объёма в $k = 5$ раз? Считать, что температура при увеличении объёма не изменяется.

Решение. В сосуде первоначально содержался насыщенный пар массой $m_1 = \rho V = 8 \cdot 10^{-3}$ кг (объёмом, занимаемым водой, можно пренебречь).

Масса воды и пара была равна $m + m_1 = 2 \cdot 10^{-2}$ кг. Для насыщения объёма, равного kV, необходим пар массой $m_2 = \rho kV = 4 \cdot 10^{-2}$ кг. Так как $m + m_1 < m_2$, то после увеличения объёма пар станет ненасыщенным. Его плотность $\rho_1 = \frac{m + m_1}{kV}$.

Давление пара при данной температуре прямо пропорционально плотности. Поэтому

$$p_1 = \frac{p\rho_1}{\rho} = \frac{p(m + m_1)}{\rho kV} = 550 \text{ Па}.$$

Задача 2

В закрытом сосуде объёмом $V_1 = 0,5$ м³ находится вода массой $m = 0,5$ кг. Сосуд нагрели до температуры $t = 147$ °C. На какую величину ΔV следует изменить объём сосуда,

чтобы в нём содержался только насыщенный пар? Давление насыщенного пара при температуре $t = 147$ °С равно $p_0 = 4{,}7 \cdot 10^5$ Па.

Решение. Насыщенный пар при давлении p_0 занимает объём

$$V = \frac{mRT}{p_0 M} = 0{,}2 \text{ м}^3,$$

где $M = 0{,}018$ кг/моль — молярная масса воды. Объём сосуда $V_1 > V$ и пар не является насыщенным. Чтобы пар стал насыщенным, объём сосуда следует изменить на

$$\Delta V = V - V_1 = \frac{mRT}{p_0 M} - V_1 = -0{,}3 \text{ м}^3.$$

Объём сосуда должен быть уменьшен на 0,3 м^3.

Задача 3

Кусок алюминия массой $m_1 = 537$ г, нагретый до температуры $t_1 = 200$ °С, опустили в воду массой $m_2 = 400$ г при температуре $t_2 = 16$ °С. Вода нагрелась до температуры $t = 50$ °С и частично испарилась. Определите массу испарившейся воды. Удельная теплоёмкость алюминия $c_1 = 920$ Дж/(кг · К). Удельная теплоёмкость воды $c_2 = 4200$ Дж/(кг · К), а удельная теплота парообразования воды при температуре кипения ($t_к = 100$ °С) равна $r = 2{,}26$ МДж/кг. Тепловыми потерями пренебречь.

Решение. Количество теплоты, отданное куском алюминия:

$$Q_1 = c_1 m_1 (t - t_1).$$

Количество теплоты, полученное водой, складывается из количества теплоты, полученного всей водой при нагревании от t_2 до t:

$$Q_2 = c_2 m_2 (t - t_2),$$

и количества теплоты, израсходованного для нагревания части воды массой m_3 от t до $t_к$ и её испарения при этой температуре:

$$Q_3 = c_2 m_3 (t_к - t) + r m_3.$$

Пренебрегая тепловыми потерями, запишем уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0,$$

или

$$c_1m_1(t-t_1)+c_2m_2(t-t_2)+c_3m_3(t_к-t)+rm_3=0.$$

Откуда

$$m_3=\frac{c_1m_1(t_1-t)-c_2m_2(t-t_2)}{c_2(t_к-t)+r}=7\text{ г}.$$

Задача 4

Пористое тело было помещено для просушки под колокол вакуумного насоса. Давление под колоколом держалось на уровне 6,5 мм рт. ст. в течение 1 ч, после чего резко упало. Подача насоса 60 л/мин. Установившаяся под колоколом насоса температура $t = 5$ °С. Сколько воды содержало тело?

Решение. Давление $p = 6{,}5$ мм рт. ст. — это давление насыщенных водяных паров при $t = 5$ °С. Резкое падение давления свидетельствует о том, что вся вода превратилась в пар. Объём пара, откачанного насосом до полного испарения воды, $V = 3600$ л. Пользуясь уравнением состояния Менделеева—Клапейрона, находим искомую массу воды

$$m=\frac{pVM}{RT}\approx 23{,}4\text{ г}.$$

Задача 5

В сосуде находится воздух, относительная влажность которого при температуре $t_1 = 10$ °С равна $\varphi_1 = 60\%$. Какой будет относительная влажность φ_2 после уменьшения объёма сосуда в n раз ($n = 3$) и нагревания газа до температуры $t_2 = 100$ °С? Плотность насыщенных водяных паров при температуре t_1 равна $\rho = 9{,}4\cdot10^{-3}$ кг/м³.

Решение. При температуре t_1 абсолютная влажность (до сжатия) равна $\rho_1 = \varphi_1\rho$. После сжатия масса влаги, приходящаяся на единицу объёма сосуда (не только в виде паров, но и в виде сконденсировавшейся жидкости, если возникли условия для конденсации), будет равна $\rho_2 = n\varphi_1\rho = 1{,}69\cdot10^{-2}$ кг/м³.

При температуре $t_2 = 100$ °С давление насыщенных водяных паров равно нормальному атмосферному давлению $p_0 = 10^5$ Па, и их плотность

$$\rho_3=\frac{Mp_0}{RT_2}=0{,}58\text{ кг/м}^3,$$

где $M = 0{,}018$ кг/моль.

Так как $\rho_3 > \rho_2$, то в сосуде будет ненасыщенный пар с относительной влажностью

$$\varphi_2 = \frac{\rho_2}{\rho_3} = \frac{n\varphi_1\rho RT_2}{Mp_0} = 2{,}9 \cdot 10^{-2} = 2{,}9\%.$$

Упражнение 5

1. Почему капельки воды на разогретой сковородке «крутятся» на ней более минуты, прежде чем исчезнуть?

2. В колбе кипятят воду. Затем колбу снимают с огня и закупоривают резиновой пробкой. Если теперь охладить колбу, облив её холодной водой, то вода в колбе закипает. Почему?

3. Два полых, герметически запаянных шара, в одном из которых вода, соединены трубкой (рис. 6.20). Воздух из шаров откачан. Если пустой шар поместить в сосуд с жидким воздухом, то вода в другом шаре быстро замёрзнет. Объясните явление.

4. На улице целый день моросит холодный осенний дождь. В комнате развешено выстиранное бельё. Высохнет ли бельё быстрее, если открыть форточку?

5. На рисунке 6.21 изображён прибор, называемый кипятильником Франклина. Этот прибор состоит из двух полых стеклянных шаров, соединённых трубкой. В прибор налито некоторое количество спирта и откачан воздух. Если прибор слегка наклонить, то спирт соберётся в одном (левом) шаре (см. рис. 6.21). Обхватив этот шар ладонью, мы увидим, что спирт быстро перейдёт в другой (правый) шар, хотя он расположен немного выше, и будет

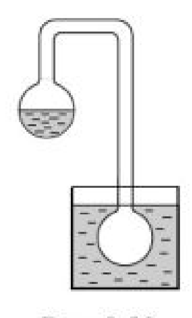



Рис. 6.20

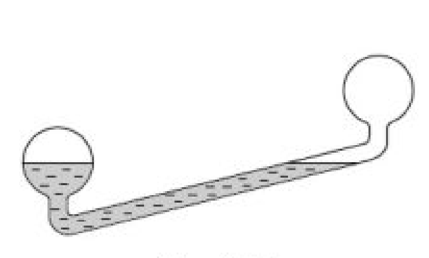
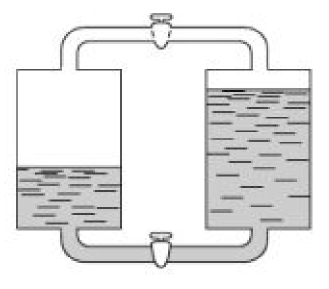


Рис. 6.21

в нём бурлить, подобно кипящей воде. Объясните явление.


Рис. 6.22

6. Можно ли газ, имеющий температуру ниже критической, перевести непрерывным путём (минуя состояние равновесия между жидкостью и газом) в жидкость той же температуры?

7. Два сосуда, соединённых трубками с кранами, наполнены водой до разных уровней (рис. 6.22). Воздух из сосудов откачан. Что произойдёт, если соединить сосуды, открыв кран: 1) в нижней трубке; 2) в верхней трубке?

8. Опишите, что будет происходить с веществом, если его нагревать при постоянных объёмах сосудов V_0, $V_к$ и V_1 (рис. 6.23).

9. Сравните качественно температуру кипения и удельную теплоту парообразования воды в глубокой шахте и на поверхности земли.

10. Почему в момент выключения газовой горелки из кипящего чайника сразу же вырывается струя пара, хотя до этого пара не было видно?

11. В котёл объёмом $V = 5$ м^3 накачали воду массой $m_1 = 20$ кг и нагрели содержимое котла до температуры $t = 180$ °С. Найдите массу m_2 и давление p пара в котле. Плотность насыщенного водяного пара при температуре

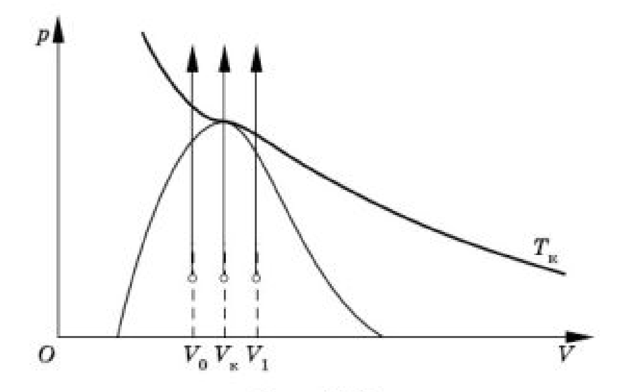


Рис. 6.23

18. После понижения температуры от 27 до 10 °C оказалось, что из каждого кубического метра воздуха выделилось 8 г воды. Какова была относительная влажность воздуха при 27 °C? Давление насыщенного водяного пара при 27 °C равно 3,56 кПа, а при 10 °C — 1,23 кПа.

---

1. Процесс испарения положен в основу функционирования такого устройства, как биоклиматизатор. Подготовьте доклад об этом устройстве.
2. На основе хронологического анализа и изучения различных информационных источников подготовьте доклад «Сжижение газов: учёные-исследователи, установки, хранение и применение жидких газов, особые свойства веществ при низких температурах, перспективы исследований».
3. Каким образом может выглядеть диаграмма равновесных состояний человека и окружающего его социума?
4. Напишите эссе «Как влажность воздуха влияет на жизнедеятельность человека».
5. Подготовьте фотоальбом по теме «Влажность воздуха».
6. Сделайте презентацию «Приборы, измеряющие влажность воздуха».

Глава 7

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ В ЖИДКОСТЯХ

В окружающем нас мире наряду с тяготением, упругостью и трением действует ещё одна сила, на которую мы обычно мало или совсем не обращаем внимания. Сила эта сравнительно невелика, её действие никогда не вызывает впечатляющих эффектов. Тем не менее мы не можем налить воды в стакан, вообще ничего не можем проделать с какой-либо жидкостью без того, чтобы не привести в действие силы, о которых сейчас пойдёт речь. Это силы поверхностного натяжения.

§ 7.1. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Познакомимся с явлениями, вызванными поверхностным натяжением.

Поверхностные эффекты

К вызываемым поверхностным натяжением эффектам мы настолько привыкли, что не замечаем их, если не развлекаемся пусканием мыльных пузырей. Однако в природе и нашей жизни они играют немалую роль. Без них мы не могли бы писать чернилами. Обычная ручка не зачерпнула бы чернил из чернильницы, а автоматическая сразу же поставила бы большую кляксу, опорожнив весь свой резервуар. Нельзя было бы намылить руки, пена не образовывалась бы. Слабый дождик промочил бы одежду насквозь, а радугу нельзя было бы видеть ни при какой погоде. Нарушился бы водный режим почвы, что оказалось бы гибельным для растений.

Проще всего уловить характер сил поверхностного натяжения, наблюдая образование капли у плохо закрытого или неисправного крана. Всмотритесь внимательно, как постепенно растёт капля, образуется сужение — шейка, и капля отрывается (рис. 7.1). Не нужно много фантазии, чтобы представить себе, что вода как бы заключена в эластичный мешочек и этот мешочек разрывается, когда его прочность становится недостаточной для удержания большой массы воды. В действительности, конечно, никакого мешочка нет, но сам поверхностный слой воды ведёт себя как растянутая эластичная плёнка.

Такое же впечатление производит плёнка мыльного пузыря. Она походит на тонкую растянутую резину детского шарика. Если вынуть соломинку изо рта, то из пузыря выйдет воздух и пузырь сожмётся.

Осторожно положите иглу (или лезвие безопасной бритвы) на поверхность воды. Поверхностная плёнка прогнётся и не даст игле (лезвию) утонуть (рис. 7.2). По той же причине лёгкие водомерки могут быстро скользить по поверхности воды, как конькобежцы по льду (рис. 7.3).

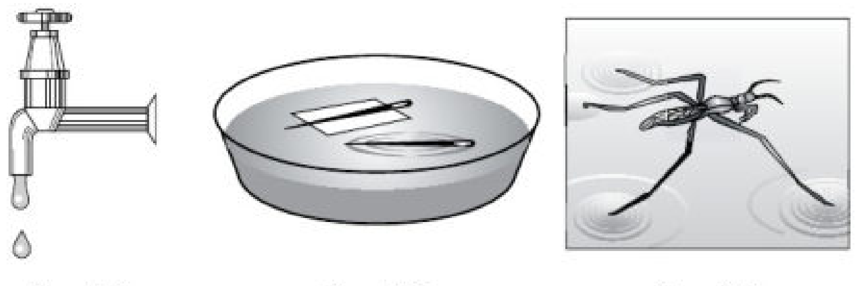


Рис. 7.1 Рис. 7.2 Рис. 7.3

Прогиб плёнки не позволяет выливаться воде, осторожно налитой в достаточно частое решето. Так что «можно» носить воду в решете. Это показывает, как трудно порой, даже при желании, сказать настоящую бессмыслицу. Ткань — то же решето, образованное переплетением нитей. Поверхностное натяжение препятствует просачиванию воды сквозь ткань, и поэтому она не промокнет насквозь мгновенно.

Поверхность жидкости стремится к сокращению

Многочисленные наблюдения и опыты показывают, что жидкость принимает такую форму, при которой её свободная поверхность имеет наименьшую площадь. В своём стрем-

лении сократиться поверхностная плёнка придавала бы жидкости сферическую форму, если бы не притяжение к Земле. Чем меньше капелька, тем бо́льшую роль играют поверхностные силы по сравнению с объёмными (силами тяготения). Поэтому маленькие капельки росы близки по форме к шару. При свободном падении возникает состояние невесомости, и поэтому дождевые капли почти строго шарообразны*. Из-за преломления солнечных лучей в этих каплях возникает радуга. Не будь капли сферическими, не было бы и радуги.

В космическом корабле, находящемся в состоянии невесомости, шарообразную форму принимают не только отдельные капли, но и жидкости большой массы.

Жидкость может приобрести шарообразную форму и в земных условиях, если скомпенсировать каким-либо способом силу тяжести.

Интересный опыт был выполнен бельгийским физиком Ж. Плато. Для проведения этого опыта большую каплю анилина надо ввести в раствор поваренной соли, плотность которого равна плотности анилина. Капля будет находиться в равновесии, так как сила тяжести, действующая на каплю, уравновешивается архимедовой силой. В этом случае капля принимает форму шара (рис. 7.4).

Рассмотрим ещё несколько опытов, подтверждающих стремление жидкости уменьшить поверхность соприкосновения с воздухом или паром этой жидкости. Такие же явления наблюдаются на границе двух несмешивающихся жидкостей.

1. На слегка вогнутое часовое стекло нальём очень слабый водный раствор серной кислоты. Затем при помощи пипетки выпустим в раствор струёй множество капелек ртути (рис. 7.5, *а*). Вскоре эти маленькие капли ртути сольются

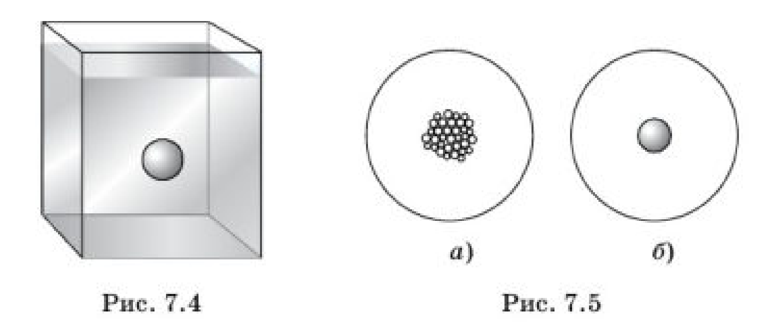


Рис. 7.4 Рис. 7.5

* Небольшое отступление от сферичности капель вызвано сопротивлением воздуха.

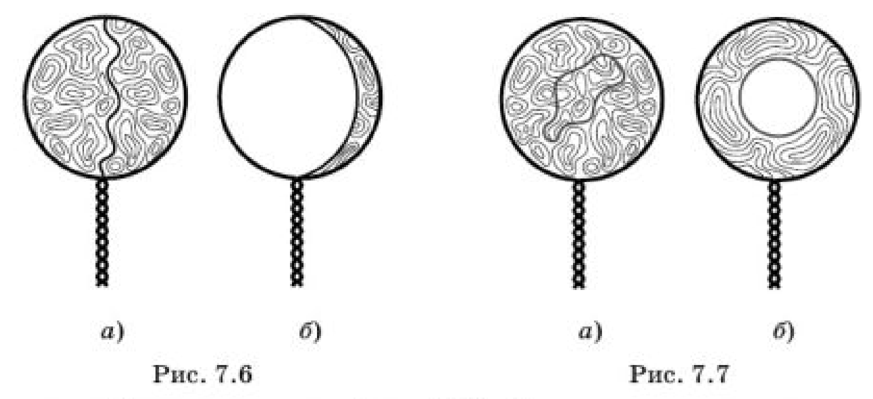


Рис. 7.6 Рис. 7.7

в одну большую каплю (рис. 7.5, *б*), площадь поверхности которой меньше суммарной площади поверхностей множества мелких капель.

2. К двум точкам проволочного каркаса привяжем нить, длина которой больше диаметра каркаса. Погрузив каркас в раствор мыла, получим мыльную плёнку, на которой нить будет лежать в произвольном положении (рис. 7.6, *а*). Если проколоть плёнку с одной стороны нити, то плёнка, оставшаяся по другую сторону нити, сокращаясь, натянет нить так, как показано на рисунке 7.6, *б*.

3. Предыдущий опыт можно видоизменить, положив на плёнку, образованную в проволочном каркасе, петлю (рис. 7.7, *а*). Если прорвать плёнку внутри петли, то она примет форму окружности (рис. 7.7, *б*).

4. Если плёнки образуются на проволочных каркасах, имеющих различные геометрические формы (куб, тетраэдр и др.), то для каждого каркаса плёнка всегда устанавливается совершенно определённым образом, при котором её поверхность имеет наименьшую площадь (рис. 7.8, *а*, *б*).

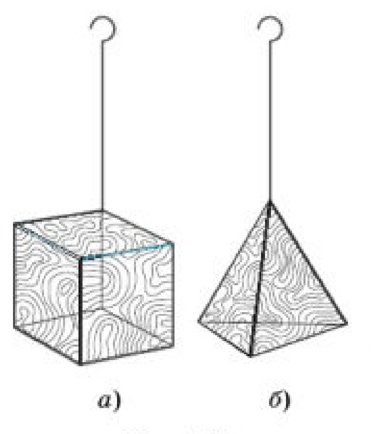


Рис. 7.8

Поверхность жидкости обладает загадочным на первый взгляд свойством. Она стремится сократиться так, чтобы площадь её поверхности стала минимальной.

? Опишите опыты, доказывающие стремление поверхности жидкости к сокращению.

§ 7.2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ КАРТИНА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Можно понять причину, заставляющую поверхность жидкости сокращаться, если представить себе, в каких условиях находятся молекулы поверхностного слоя жидкости.

Происхождение сил поверхностного натяжения

Наглядно появление сил поверхностного натяжения можно объяснить следующим образом. Если большая группа индивидуумов наделена свойством притягивать друг друга или индивидуумы по своей воле устремляются друг к другу, то результат будет один: они соберутся в ком, подобный пчелиному рою (рис. 7.9). Каждый индивидуум «стремится» внутрь этого кома, и поверхность кома сокращается, приближаясь к сфере. Перед вами модель, объясняющая возникновение поверхностного натяжения.

Молекулы жидкости, притягиваемые друг к другу силами межмолекулярного притяжения, и есть собрание индивидуумов, стремящихся сблизиться. Каждая молекула на поверхности притягивается остальными молекулами, находящимися внутри жидкости, и поэтому имеет тенденцию к погружению вглубь. Так как жидкость текуча из-за перескоков молекул из одного «оседлого» положения в другое, то она принимает такую форму, при которой число молекул на поверхности минимально, т. е. площадь поверхности минимальна. А минимальную поверхность при данном объёме имеет шар. Площадь поверхности жидкости уменьшается, и воспринимается это как поверхностное натяжение.

Здесь обнаруживается, что происхождение поверхностных сил совсем иное, чем упругих сил растянутой резиновой плёнки. При сокращении резины сила упругости ослабевает. Силы же поверхностного натяжения никак не меняются по мере сокращения площади поверхности плёнки, так как плотность жидкости, а следовательно, и среднее расстояние между молекулами на поверхности не меняются.

Таким образом, возникновение поверхностных сил нельзя объяснить столь просто и наглядно, как возникновение сил упругости, где всё связано с изменением расстояний между молекулами. Здесь всё

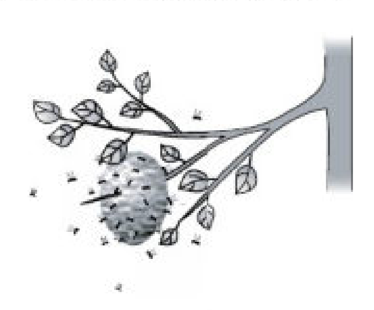


Рис. 7.9

сложнее, так как силы поверхностного натяжения проявляются при сложной перестройке формы всей жидкости без изменения её объёма.

Молекулярная картина поверхностного слоя

Поверхность раздела между жидкостью и газом представляет собой не геометрическую линию, а слой малой (в несколько молекулярных диаметров) толщины.

Молекулы у поверхности раздела двух сред находятся в иных условиях, чем молекулы в глубине жидкости. Молекулу в глубине жидкости окружают со всех сторон соседние молекулы. Молекула же поверхности жидкости подвергается воздействию только молекул, находящихся внутри жидкости. Плотность пара при температурах, далёких от критической, много меньше плотности жидкости. Поэтому силами взаимодействия молекулы у поверхности с молекулами пара можно пренебречь.

Вспомните, что молекулы притягиваются друг к другу на расстояниях порядка нескольких молекулярных радиусов и отталкиваются на очень близких расстояниях. Силы притяжения, действующие на молекулу поверхностного слоя со стороны всех остальных молекул, дают равнодействующую, направленную вниз. Однако соседние «нижние» молекулы на данную молекулу действуют силами отталкивания. Благодаря этому молекула находится в равновесии. Правда, любая молекула участвует в тепловом движении. Но для молекул жидкости это движение сводится к колебаниям около некоторых положений равновесия, причём время от времени эти положения меняются. Тогда на место молекулы, ушедшей в глубь жидкости, приходит другая и т. д.

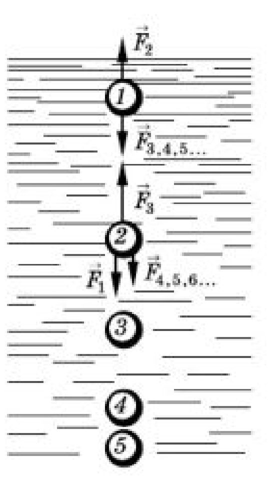


Рис. 7.10

В результате действия молекулярных сил притяжения и отталкивания плотность жидкости в поверхностном слое оказывается меньше, чем в глубине. В самом деле, на молекулу *1* (рис. 7.10) действует сила отталкивания $\vec{F}_2$ со стороны молекулы *2* и сила притяжения $\vec{F}_{3,4,5...}$ со стороны всех остальных молекул (*3*, *4*, *5*...). На молекулу *2* действуют сила притяжения $\vec{F}_{4,5,6...}$

со стороны лежащих в глубине молекул и две силы отталкивания: $\vec{F}_3$ со стороны молекулы *3* и $\vec{F}_1$ со стороны молекулы *1*. Так как сила $\vec{F}_3$ уравновешивает сумму сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_{4,5,6...}$, то $\vec{F}_3 > \vec{F}_1$.

Но сила отталкивания, действующая между молекулами, тем больше, чем ближе друг к другу расположены молекулы. Поэтому расстояние *1—2* в среднем больше расстояния *2—3*. Аналогично легко установить, что расстояние *2—3* больше расстояния *3—4* и т. д., пока не перестанет сказываться близость молекулы к поверхности.

Молекулы поверхностного слоя находятся в среднем на бóльших расстояниях друг от друга, чем молекулы внутри жидкости. Жидкость в поверхностном слое находится в растянутом, напряжённом состоянии.

Жидкость в поверхностном слое растянута, и потому вдоль поверхности действует сила, стремящаяся сократить эту поверхность.

? 1. Изобразите молекулярную картину поверхностного слоя жидкости. Объясните её.
2. Каким образом возникают поверхностные силы?
3. Почему поверхность жидкости стремится «сократиться»?

§ 7.3. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ

Когда вода из опрокинутого стакана разливается по полу или когда мы выдуваем мыльный пузырь, поверхность жидкости увеличивается. При этом возникают новые участки разреженного поверхностного слоя. Среднее расстояние между молекулами при их переходе из глубины жидкости на её поверхность возрастает. Силы притяжения между молекулами жидкости совершают при этом отрицательную работу. В соответствии с законами механики это означает увеличение потенциальной энергии молекул, перешедших из глубины жидкости на поверхность.

Молекулы поверхностного слоя жидкости обладают избытком потенциальной энергии по сравнению с энергией, которой эти молекулы обладали бы, находясь внутри жидкости.

Избыточную потенциальную энергию, которой обладают молекулы на поверхности жидкости, называют поверхностной энергией.

С макроскопической (термодинамической) точки зрения поверхностная энергия — это один из видов внутренней энергии, отсутствующей у газов, но имеющейся у жидкостей*.

При растекании воды из опрокинутого стакана по полу увеличение энергии молекул поверхностного слоя происходит за счёт работы силы тяжести. А при выдувании мыльного пузыря увеличение потенциальной энергии молекул поверхностного слоя происходит за счёт работы сил давления воздуха в пузыре. Ведь для того чтобы пузырь раздувался, давление воздуха в нём должно быть больше атмосферного.

Поверхностное натяжение

Молекулы на всех участках поверхностного слоя жидкости находятся в одинаковых условиях, и два участка одинаковой площади обладают одинаковой поверхностной энергией. Это означает, что *поверхностная энергия прямо пропорциональна площади поверхности жидкости*. Поэтому отношение поверхностной энергии $U_п$ участка поверхности жидкости к площади S этого участка есть величина постоянная, не зависящая от площади S. Эту величину называют коэффициентом поверхностного натяжения или просто поверхностным натяжением и обозначают буквой σ:

$$\sigma = \frac{U_п}{S}. \quad (7.3.1)$$

Поверхностное натяжение представляет собой *удельную поверхностную энергию*, т. е. энергию, приходящуюся на поверхность единичной площади.

В СИ поверхностное натяжение выражается в джоулях на квадратный метр (Дж/м^2). Так как 1 Дж = 1 Н · м, то поверхностное натяжение можно выражать и в ньютонах на метр (Н/м).

Поверхностное натяжение σ зависит от природы граничащих сред и от температуры. По мере повышения температуры различие между жидкостью и её насыщенным паром постепенно стирается и при критической температуре исчезает совсем. Соответственно поверхностное натяжение для границы жидкость — насыщенный пар с повышением тем-

---

* Поверхностной энергией обладают также твёрдые тела. Ведь особые условия, в которых находятся молекулы на поверхности жидкости, характерны и для поверхности твёрдых тел.

пературы уменьшается и при критической температуре становится равным нулю.

Из формулы (7.3.1) следует, что

$$U_{п} = \sigma S. \quad (7.3.2)$$

Следовательно, при уменьшении площади поверхности поверхностная энергия уменьшается. Молекулярные силы совершают при этом положительную работу, так как расстояния между молекулами при переходе их из поверхностного слоя в глубь жидкости уменьшаются. В состоянии равновесия жидкости поверхностная энергия имеет минимальное значение. Это соответствует минимальной при заданном объёме площади поверхности. Поэтому, как говорилось в § 7.1, жидкость принимает форму шара, если нет других сил, искажающих её естественную сферическую форму.

В поверхностном слое жидкости запасена энергия, прямо пропорциональная площади поверхности. Поверхностная энергия — одна из форм внутренней энергии.

? 1. Почему молекулы на поверхности жидкости обладают избыточной потенциальной энергией?
2. Докажите, что поверхностная энергия прямо пропорциональна площади поверхности жидкости.
3. Докажите, что поверхностная энергия — это одна из форм внутренней энергии.

§ 7.4. СИЛА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

В § 7.1 были рассмотрены опыты, свидетельствующие о стремлении поверхности жидкости к сокращению. Это сокращение вызывается силой поверхностного натяжения.

Силу, которая действует вдоль поверхности жидкости перпендикулярно линии, ограничивающей эту поверхность, и стремится сократить её до минимума, называют силой поверхностного натяжения.

Измерение силы поверхностного натяжения

Чтобы измерить силу поверхностного натяжения, проделаем следующий опыт. Возьмём прямоугольную проволочную рамку, одна сторона которой AB длиной l может переме-

щаться с малым трением в вертикальной плоскости. Погрузив рамку в сосуд с мыльным раствором, получим на ней мыльную плёнку (рис. 7.11, *а*). Как только мы вытащим рамку из мыльного раствора, проволочка AB сразу же придёт в движение. Мыльная плёнка будет сокращать свою поверхность. Следовательно, на проволочку AB действует сила, направленная перпендикулярно проволочке в сторону плёнки. Это и есть сила поверхностного натяжения.

Чтобы помешать проволочке двигаться, надо к ней приложить некоторую силу. Для создания этой силы можно прикрепить к проволочке мягкую пружину, закреплённую на основании штатива (см. рис. 7.11, *а*). Сила упругости пружины вместе с силой тяжести, действующей на проволочку, в сумме составят результирующую силу $\vec{F}_1$. Для равновесия проволочки необходимо, чтобы выполнялось равенство $\vec{F}_1 = -2\vec{F}$, где $\vec{F}$ — сила поверхностного натяжения, действующая на проволочку со стороны одной из поверхностей плёнки (рис. 7.11, *б*). Отсюда $F = \frac{F_1}{2}$.

От чего зависит сила поверхностного натяжения?

Если проволочку переместить вниз на расстояние h, то внешняя сила $F_1 = 2F$ совершит работу

$$A = F_1 h = 2Fh. \qquad (7.4.1)$$

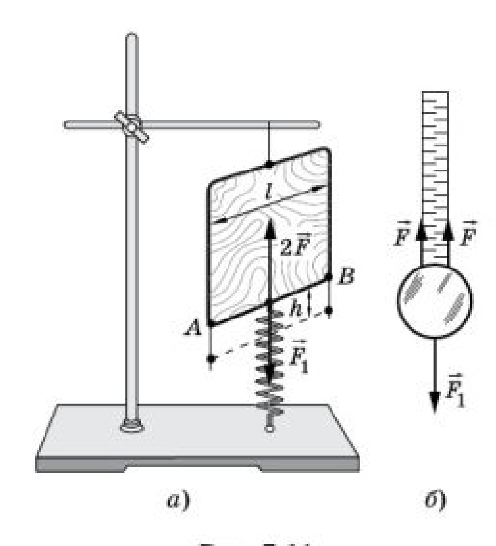


Рис. 7.11

Согласно закону сохранения энергии эта работа равна изменению энергии (в данном случае поверхностной) плёнки. Начальная поверхностная энергия мыльной плёнки площадью S_1 равна $U_{п1} = 2\sigma S_1$, так как плёнка имеет две поверхности одинаковой площади. Конечная поверхностная энергия

$$U_{п2} = 2\sigma S_2,$$

где S_2 — площадь плёнки после перемещения проволочки на расстояние h. Следовательно,

$$A = U_{п2} - U_{п1} = 2\sigma S_2 - 2\sigma S_1 = 2\sigma(S_2 - S_1).$$

Так как

$$S_2 - S_1 = lh,$$

то

$$A = 2\sigma lh. \qquad (7.4.2)$$

Приравнивая правые части выражений (7.4.1) и (7.4.2), получим

$$2Fh = 2\sigma lh.$$

Отсюда сила поверхностного натяжения, действующая на границу поверхностного слоя длиной l, равна

$$F = \sigma l. \qquad (7.4.3)$$

Направлена сила поверхностного натяжения по касательной к поверхности перпендикулярно границе поверхностного слоя (перпендикулярно проволочке AB в данном случае, см. рис. 7.11, *а*).

Измерение коэффициента поверхностного натяжения

Существует много способов измерения поверхностного натяжения жидкостей. Например, поверхностное натяжение σ можно определить, пользуясь установкой, изображённой на рисунке 7.11. Мы рассмотрим другой способ, не претендующий на большую точность результата измерений.

Прикрепим к чувствительному динамометру медную проволочку, изогнутую так, как показано на рисунке 7.12, *а*. Подставим под проволочку сосуд с водой так, чтобы прово-

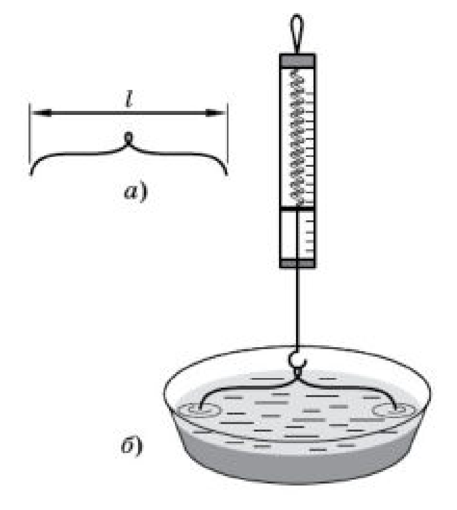


Рис. 7.12

лочка коснулась поверхности воды (рис. 7.12, *б*) и «прилипла» к ней. Будем теперь медленно опускать сосуд с водой (или, что то же, поднимать динамометр с проволочкой). Мы увидим, что вместе с проволочкой поднимается обволакивающая её водяная плёнка, а показание динамометра при этом постепенно увеличивается. Оно достигает максимального значения в момент разрыва водяной плёнки и «отрыва» проволочки от воды. Если из показаний динамометра в момент отрыва проволочки вычесть её вес, то получится сила F, равная удвоенной силе поверхностного натяжения (у водяной плёнки две поверхности):

$$F = 2\sigma l,$$

где l — длина проволочки.

Отсюда

$$\sigma = \frac{F}{2l}.$$

При длине проволочки $l = 5$ см и температуре 20 °С сила оказывается равной $7{,}3 \cdot 10^{-3}$ Н. Тогда

$$\sigma = \frac{7{,}3 \cdot 10^{-3}\ \text{Н}}{2 \cdot 0{,}05\ \text{м}} = 7{,}3 \cdot 10^{-2}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Результаты измерений поверхностных натяжений некоторых жидкостей приведены в таблице 4.

Таблица 4

Жидкость	Температура, °C	Поверхностное натяжение, Н/м
Вода (чистая)	20	0,073
Раствор мыла	20	0,040
Спирт	20	0,022
Эфир	20	0,017
Ртуть	20	0,470
Золото (расплавленное)	1130	1,102
Жидкий водород	–253	0,0021
Жидкий гелий	–269	0,00012

Из таблицы 4 видно, что у легкоиспаряющихся жидкостей (эфира, спирта) поверхностное натяжение меньше, чем у нелетучих жидкостей, например у ртути. Очень мало́ поверхностное натяжение у жидкого водорода и особенно у жидкого гелия. У жидких металлов поверхностное натяжение, наоборот, очень велико.

Различие в поверхностном натяжении жидкостей объясняется различием в силах межмолекулярного взаимодействия.

Зависимость поверхностного натяжения от примесей

Значительное влияние на поверхностное натяжение жидкости оказывают примеси растворённых в ней веществ. Наличие примесей в жидкости приводит, как правило, к уменьшению поверхностного натяжения. В этом можно убедиться, проделав следующий опыт. Нальём в кювету чистой воды и насыплем на её поверхность ликоподий, тальк или мелко натёртую пробку (рис. 7.13, *а*). Это делается для того, чтобы стало заметнее перемещение поверхностного слоя воды. С помощью тонкой стеклянной трубки или пипетки введём на середину поверхности воды небольшую каплю эфира (или мыльного раствора). Мы увидим быстрое перемещение частичек порошка к бортам кюветы, а в середине появится «окно» (рис. 7.13, *б*). Это показывает, что эфир резко понижает поверхностное натяжение воды.

При растворении сахара в воде поверхностное натяжение увеличивается.

Обратите внимание: поверхностное натяжение мыльного раствора меньше, чем воды. Тем не менее мыльные пузыри

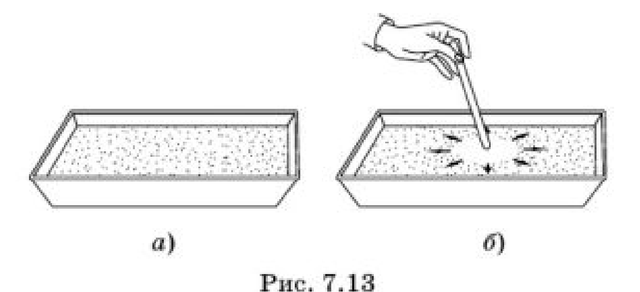


Рис. 7.13

или мыльные плёнки на проволочных рамках образуются мыльным раствором, а не чистой водой. Объясняется это следующим образом: для устойчивого равновесия плёнки силы поверхностного натяжения должны увеличиваться с высотой. Чем выше участок плёнки, тем бо́льшую массу плёнки внизу ему приходится удерживать. Следовательно, концентрация мыла на поверхности плёнки убывает с высотой (см. также § 8.4).

Вдоль поверхности любого участка жидкости перпендикулярно линии, ограничивающей этот участок, действует сила поверхностного натяжения $F = \sigma l$. Коэффициент поверхностного натяжения σ уменьшается с ростом температуры и зависит от растворённых в жидкости примесей.

? **1.** Дайте определение силы поверхностного натяжения и изобразите её направление.

2. Выведите выражение для расчёта силы поверхностного натяжения.

3. Что показывает коэффициент поверхностного натяжения?

4. Перечислите факторы, влияющие на поверхностное натяжение жидкости.

§ 7.5. СМАЧИВАНИЕ И НЕСМАЧИВАНИЕ

При рассмотрении молекулярной картины поверхностного слоя жидкости мы отмечали, что молекулы жидкости, расположенные на поверхности, разделяющей жидкость и газ (воздух или пар этой жидкости), почти не притягиваются молекулами газа (концентрация молекул газа слишком мала). Если жидкость граничит с твёрдым телом, то результат получается иным.

пластинки останется чистой (рис. 7.14, *в*). Это означает, что взаимодействие между молекулами ртути сильнее, чем взаимодействие между молекулами стекла и ртути. Здесь можно привести аналогию с растягиваемой цепью, которая рвётся там, где у неё самое слабое звено.

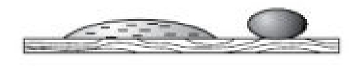


Рис. 7.15

Отличить смачивающую жидкость от несмачивающей очень просто. Для этого достаточно нанести каплю жидкости на поверхность твёрдого тела. Если жидкость смачивает тело, то капля растекается по поверхности, несмачивающая жидкость не растекается (рис. 7.15).

Мениск

Форма поверхности жидкости в том месте, где она соприкасается с твёрдой стенкой и газом, зависит от того, смачивает или не смачивает жидкость стенки сосуда. Если жидкость является смачивающей, то угол θ между касательной к поверхности жидкости и твёрдым телом на общей границе трёх сред, отсчитываемый внутрь жидкости (краевой угол), острый (рис. 7.16, *а*). В том случае, когда жидкость не смачивает твёрдое тело, краевой угол θ тупой (рис. 7.16, *б*). В случае полного смачивания $\theta = 0°$, а полного несмачивания — $\theta = 180°$.

Только удалённая от стенок сосуда часть поверхности жидкости горизонтальна. Сближая противоположные стенки (беря более узкий сосуд), мы будем сокращать горизонтальную часть свободной поверхности жидкости (рис. 7.17, *а*, *б*), пока наконец она не исчезнет совсем (рис. 7.17, *в*). Поверх-

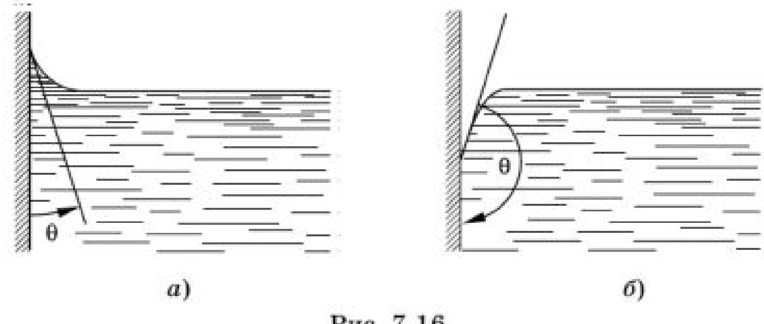


Рис. 7.16

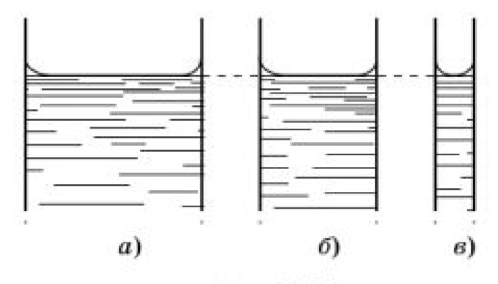


Рис. 7.17

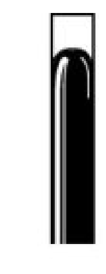


Рис. 7.18

ность жидкости становится изогнутой. Изогнутая поверхность жидкости называется **мениском** (от греч. menisos — лунный серп).

В узких трубках смачивающие жидкости имеют вогнутый мениск (см. рис. 7.17, *в*), несмачивающие — выпуклый (рис. 7.18).

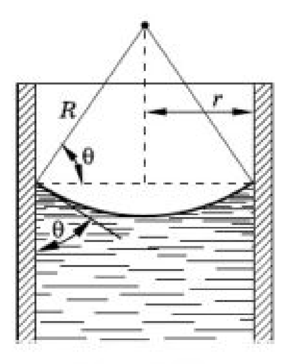


Рис. 7.19

В узких трубках при полном смачивании (или несмачивании) мениск жидкости представляет собой полусферу, радиус которой равен радиусу r канала трубки. Если смачивание (или несмачивание) неполное, то мениск жидкости в узких трубках также принимают за часть сферы, радиус которой R связан с радиусом трубки соотношением $r = R\cos\theta$ (рис. 7.19).

Значение смачивания

Смачивание имеет важное значение в промышленности и быту. Хорошее смачивание необходимо при крашении и стирке, обработке фотографических материалов, нанесении лакокрасочных покрытий и др.

Моющие свойства мыла и синтетических порошков объясняются тем, что мыльный раствор имеет меньшее поверхностное натяжение, чем вода. Большое поверхностное натяжение воды мешает ей проникать в промежутки между волокнами ткани и в мелкие поры.

Существенно ещё одно обстоятельство. Молекулы мыла имеют продолговатую форму. Один из концов имеет «сродство» к воде и погружается в воду. Другой конец отталкивается от воды и присоединяется к молекулам жира. Молекулы

воды обволакивают частицы жира и способствуют их вымыванию.

Склеивание деревянных, кожаных, резиновых и других материалов также пример использования свойства смачивания. Пайка тоже связана со свойствами смачивания и несмачивания. Чтобы расплавленный припой (например, сплав олова со свинцом) хорошо растекался по поверхностям спаиваемых металлических предметов и прилипал к ним, надо эти поверхности тщательно очищать от жира, пыли, оксидов. Оловянным припоем хорошо можно паять детали из меди, латуни. Но алюминий не смачивается оловянным припоем. Для пайки алюминиевых изделий применяют специальный припой, состоящий из алюминия и кремния.

Важный пример применения явления смачивания и несмачивания — флотационный процесс обогащения руд. Для этой цели руду измельчают так, что кусочки ценной породы теряют связь с ненужной примесью. Затем полученный порошок взбалтывают в воде, в которую добавляют маслообразные вещества. Масло обволакивает (смачивает) ценную породу, но не пристает к примесям (не смачивает их). В полученную взвесь вдувают воздух. Пузырьки воздуха прилипают к несмачивающимся водой (вследствие покрытия масляной плёнкой) кусочкам ценной породы. Это происходит потому, что тонкий слой воды между пузырьками воздуха и масляной плёнкой, обволакивающей ценную породу, стремясь уменьшить свою поверхность, обнажает поверхность масляной плёнки (подобно тому как вода на жирной поверхности собирается в капли, обнажая эту поверхность). Крупицы ценной породы вместе с прилипшими к ним пузырьками воздуха под действием архимедовой силы поднимаются вверх, в то время как ненужные примеси оседают на дно (рис. 7.20).

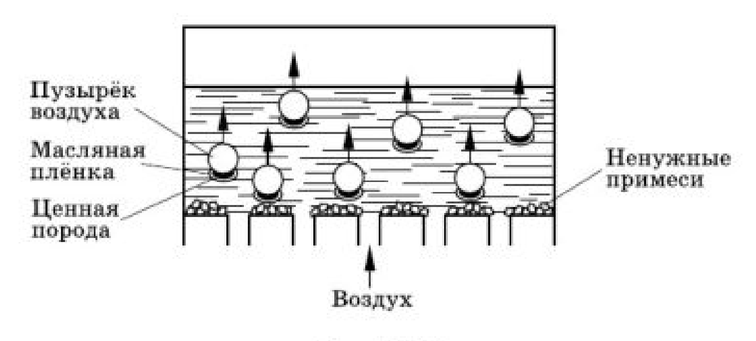


Рис. 7.20

Вода смачивает поверхности одних твёрдых тел (прилипает к ним) и не смачивает поверхности других. Эти свойства воды определяют множество полезных и просто любопытных явлений.

? 1. Объясните явления смачивания и несмачивания.

2. Каким образом можно отличить смачивающую жидкость от несмачивающей?

§ 7.6. ДАВЛЕНИЕ ПОД ИСКРИВЛЁННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОСТИ

При своём стремлении к сокращению поверхностная плёнка создаёт добавочное давление. Давление, которое всегда существует внутри жидкости, увеличивается, когда её поверхность выпуклая, и уменьшается под вогнутой поверхностью.

Влияние кривизны поверхности на давление внутри жидкости

В существовании этого влияния можно убедиться на простом опыте. Возьмём стеклянную воронку с изогнутой под прямым углом трубкой. Направим конец воронки с выдутым мыльным пузырём на пламя свечи (рис. 7.21). Мы заметим, что пламя свечи отклоняется. Это говорит о том, что из воронки воздух вытекает, значит, давление воздуха в пузыре больше атмосферного.

Представляет интерес и такой опыт. Соединим широкий сосуд A при помощи резиновой трубки с узкой стеклянной трубкой. Наполним эти сообщающиеся сосуды водой. Сначала установим конец трубки B на уровне жидкости в сосуде A. В этом случае поверхность воды в трубке B, как и в сосуде A, является плоской (рис. 7.22, *а*). Так как вода в обоих сосудах находится на одном горизонтальном уровне, то давление непосредственно под плоской поверхностью жидкости в обоих сосудах одинаково и равно атмосферному.



Рис. 7.21

Станем медленно опускать трубку B. Мы заметим, что поверхность воды в ней приобрела выпуклую сферическую форму (рис. 7.22, *б*). Теперь вода в сосуде A и трубке B находится не на одном уровне. Давление воды в сосуде A на уровне кон-

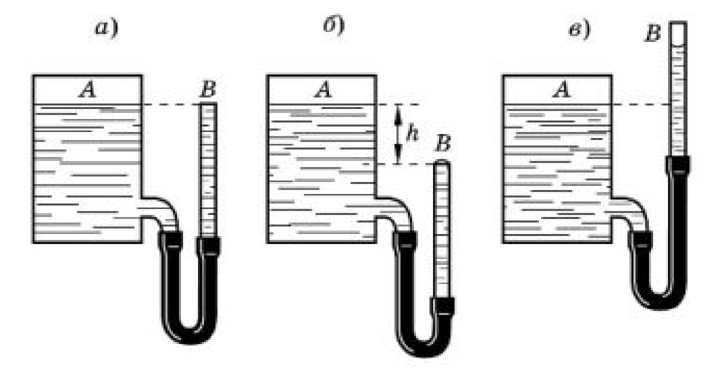


Рис. 7.22

ца трубки B больше атмосферного на величину $\rho g h$, где ρ — плотность воды, h — разность уровней воды в сосудах A и B. Так как жидкость в сообщающихся сосудах A и B находится в равновесии, то у конца B непосредственно под выпуклой поверхностью давление тоже больше атмосферного.

Продолжим опыт, осторожно опуская трубку B ещё ниже. Вследствие этого кривизна поверхности воды в трубке B увеличится (радиус сферической поверхности воды уменьшится). Увеличится и разность уровней воды в сосуде A и трубке B. Это значит, что добавочное давление под выпуклой поверхностью жидкости тем больше, чем меньше радиус кривизны этой поверхности.

Если конец трубки B поднять выше уровня воды в сосуде A (рис. 7.22, *в*), то поверхность воды в трубке B станет вогнутой (вода смачивает стекло) и уровень воды в трубке B будет выше уровня воды в сосуде A. А это означает, что под искривлённой (вогнутой) поверхностью воды в трубке B давление меньше атмосферного.

Отсюда следует вывод: *давление непосредственно под выпуклой поверхностью жидкости больше давления под плоской поверхностью жидкости, а давление под вогнутой поверхностью жидкости меньше давления под плоской поверхностью жидкости.*

Избыточное давление под сферической поверхностью жидкости

Проще всего найти избыточное давление для поверхности, имеющей сферическую форму, используя закон сохранения энергии.

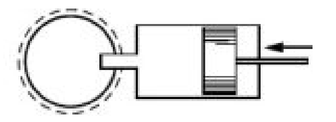


Рис. 7.23

Будем увеличивать сферическую каплю, впрыскивая внутрь неё жидкость с помощью очень тонкого шприца (рис. 7.23). Пусть при этом объём капли увеличивается от значения V_1 до значения V_2, причём приращение объёма очень мало. При очень малом увеличении объёма давление можно считать постоянным, тогда работа сил давления при изменении объёма на ΔV, равная $p\Delta V$ (см. § 5.1), в данном случае будет

$$A = -p_{и}\Delta V, \tag{7.6.1}$$

где $p_{и}$ — избыточное давление.

Работа A отрицательна, так как сила избыточного давления, действующая на элемент поверхности, направлена в сторону, противоположную направлению перемещения элемента поверхности. Эта работа равна изменению потенциальной (поверхностной) энергии, взятому с противоположным знаком:

$$A = -\Delta U_{п} = -\sigma(S_2 - S_1) = -\sigma\Delta S, \tag{7.6.2}$$

где S_1 и S_2 — начальная и конечная площади поверхности капли. Следовательно,

$$p_{и}\Delta V = \sigma\Delta S. \tag{7.6.3}$$

Найдём изменение объёма шара ΔV и изменение площади поверхности шара ΔS при малом увеличении Δr его радиуса:

$$\Delta V = \frac{4}{3}\pi(r + \Delta r)^3 - \frac{4}{3}\pi r^3 \approx 4\pi r^2\Delta r; \tag{7.6.4}$$

$$\Delta S = 4\pi(r + \Delta r)^2 - 4\pi r^2 \approx 8\pi r\Delta r. \tag{7.6.5}$$

(Здесь мы пренебрегли членами, пропорциональными Δr^2 и Δr^3 ввиду их малости.) Подставив выражения (7.6.4) и (7.6.5) в соотношение (7.6.8), получим

$$p_{и} = \frac{2\sigma}{r}. \tag{7.6.6}$$

Формула (7.6.6) применима не только для сферической капли жидкости, но и для любых искривлённых поверхностей, имеющих форму части сферы, например для таких, какие изображены на рисунках 7.17, *в*, 7.18, 7.22, *б*, *в*.

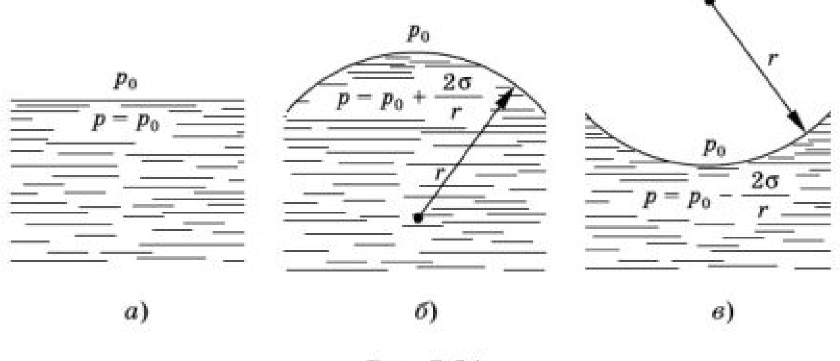


Рис. 7.24

Под выпуклой поверхностью давление больше внешнего давления, а под вогнутой меньше (рис. 7.24).

Если поверхность жидкости сферическая, то возникает разность давлений, равная

$$p - p_0 = \pm\frac{2\sigma}{r},$$

где p — давление под искривлённой поверхностью жидкости; p_0 — давление под плоской поверхностью, равное внешнему давлению; r — радиус сферы.

? 1. Каким образом кривизна поверхности влияет на давление внутри жидкости?
2. Выведите формулу избыточного давления под сферической поверхностью жидкости.

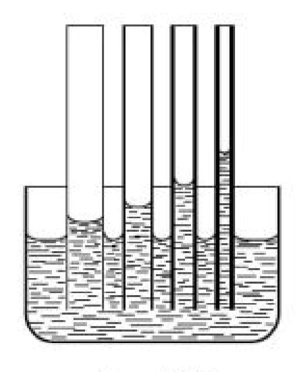
§ 7.7. КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

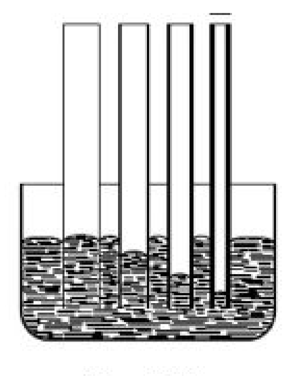
Явления смачивания и несмачивания отчётливо проявляются в узких трубках.

Под капиллярными явлениями понимают подъём или опускание жидкости в узких трубках — капиллярах* — по сравнению с уровнем жидкости в широких трубках.

Смачивающая жидкость (например, вода в стеклянной трубке) поднимается по капилляру. При этом чем меньше радиус трубки, тем на бо́льшую высоту поднимается в ней

* От латинского слова capillaris — «волосной».


Рис. 7.25


Рис. 7.26

жидкость (рис. 7.25). Жидкость, не смачивающая стенки капилляра (например, ртуть в стеклянной трубке), опускается ниже уровня жидкости в широком сосуде (рис. 7.26).

Почему смачивающая жидкость поднимается по капилляру, а несмачивающая опускается? В § 7.5 мы установили, что в случае полного смачивания и полного несмачивания мениск жидкости в узких трубках представляет собой полусферу, радиус которой равен радиусу канала трубки. Под вогнутым мениском смачивающей жидкости давление меньше, чем под плоской поверхностью (см. § 7.6). Поэтому жидкость в узкой трубке (капилляре) поднимается до тех пор, пока гидростатическое давление поднятой в капилляре жидкости на уровне плоской поверхности не скомпенсирует разность давлений. Под выпуклым мениском несмачивающей жидкости давление больше, чем под плоской поверхностью, и это ведёт к опусканию несмачивающей жидкости в узких трубках.

Подъём смачивающей жидкости по капилляру можно объяснить по-другому — непосредственным действием сил поверхностного натяжения. Вдоль границы поверхностного слоя жидкости, имеющей форму окружности, на стенки трубки действует сила поверхностного натяжения, направленная вниз (для смачивающей жидкости). Такая же по модулю сила действует на жидкость со стороны стенок трубки вверх (третий закон Ньютона). Эта сила и заставляет жидкость подниматься в узкой трубке. Подъём смачивающей жидкости по капилляру прекратится тогда, когда сила, заставляющая жидкость подниматься вверх, уравновесится силой тяжести, действующей на поднятую жидкость.

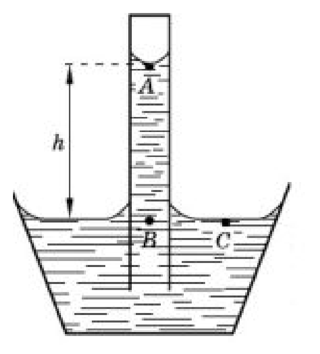


Рис. 7.27

Высота поднятия жидкости в капиллярных трубках

Пусть жидкость полностью смачивает стенки капилляра. Мениск её в этом случае имеет форму полусферы (рис. 7.27) радиусом, равным радиусу канала капилляра r. Тогда непосредственно под вогнутым мениском (в точке A) давление жидкости будет меньше атмосферного давления p_0 на величину $\frac{2\sigma}{r}$ (см. § 7.6):

$$p_A = p_0 - \frac{2\sigma}{r}. \qquad (7.7.1)$$

На глубине h, соответствующей уровню жидкости в широком сосуде (в точке B), к этому давлению прибавляется гидростатическое давление $\rho g h$, где ρ — плотность жидкости. В широком сосуде на том же уровне, т. е. непосредственно под плоской поверхностью жидкости (в точке C), давление равно атмосферному давлению p_0. Так как жидкость находится в равновесии, то давления на одном и том же уровне (в точках B и C) равны. Следовательно,

$$p_0 - \frac{2\sigma}{r} + \rho g h = p_0. \qquad (7.7.2)$$

Отсюда

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}. \qquad (7.7.3)$$

Высота поднятия жидкости в капилляре прямо пропорциональна поверхностному натяжению её и обратно пропорциональна радиусу канала капилляра и плотности жидкости.

Глубина h, на которую опускается в капилляре несмачивающая жидкость, тоже вычисляется по формуле (7.7.3). Это утверждение вы можете проверить самостоятельно.

Формулой (7.7.3) можно воспользоваться для определения поверхностного натяжения σ. Для этого необходимо по возможности точнее измерить высоту поднятия жидкости h и радиус канала трубки r. Зная плотность жидкости ρ, поверхностное натяжение σ можно найти по формуле

$$\sigma = \frac{\rho g h r}{2}.$$

Это один из наиболее распространённых способов определения поверхностного натяжения.

Капиллярные явления в природе, быту и технике

Чрезвычайно важно для растений движение и сохранение воды в почве. Почва имеет рыхлое строение, и между отдельными частицами её находятся промежутки. Узкие промежутки представляют собой капилляры. По капиллярным ходам вода поднимается к корневой системе растений и снабжает их необходимой влагой и питательными солями.

По капиллярам находящаяся в почве вода поднимается вверх и интенсивно испаряется (рис. 7.28). Чтобы уменьшить испарение, нужно разрушить капилляры. Это достигается разрыхлением почвы. Иногда требуется, наоборот, усилить приток влаги по капиллярам. Тогда почву укатывают, увеличивая этим количество капиллярных каналов.

Любопытно, а может ли вода с растворёнными в ней веществами подниматься к верхушкам высоких деревьев за счёт поверхностного натяжения (высота, например, секвойи более 100 м). Радиус капилляров в древесине от 0,01 до 0,3 мм. Значит, в самых тонких капиллярах вода не поднимается выше 1,5 м. За счёт атмосферного давления она может подняться не выше 10 м, даже если на конце трубки создать вакуум. Не может высоко поднять воду и осмотическое давление, благодаря которому давление в растворе больше, чем в чистой жидкости.

Остаётся единственное предположение: вода в капиллярах находится в растянутом состоянии, но не разрывается из-за притяжения её молекул. По мере испарения воды с листьев сила притяжения поднимает её вверх. Прямые измерения показали, что давление в капиллярах древесины действительно отрицательно и может достигать –25 атм.

В быту капиллярные явления используют при самых разнообразных обстоятельствах. Прикладывая промокательную бумагу, удаляют излишек чернил с письма, хлопчатобумажной или льняной тряпкой вытирают мокрые места на столе или на полу. Применение полотенец, салфеток возможно только благодаря наличию в них капилляров. Поднятие керосина или расплавленного стеарина по фитилям ламп и свечей обусловлено наличием в фитилях капиллярных каналов. В технике как один из способов подвода смазки к деталям машин применяют иногда фитильный способ подачи масла.

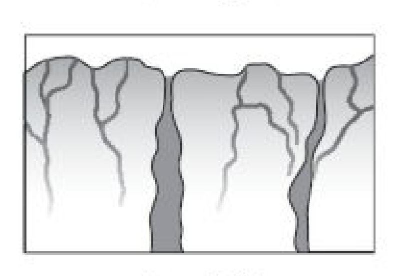


Рис. 7.28

В строительном деле приходится учитывать подъём влаги из почвы по порам строительных материалов. Из-за этого отсыревают стены зданий. Для защиты фундамента и стен от воздействия грунтовых вод и сырости применяют гидроизоляцию, покрывая фундамент горячим (жидким) битумом или обкладывая водонепроницаемым рулонным материалом (толь или рубероид).

Узких трубок (капилляров) в природе и технике великое множество. В этих трубках жидкость либо поднимается вверх на высоту $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$, *либо опускается вниз на расстояние, определяемое по той же формуле. Многие процессы в природе и технике вызываются этими движениями.*

? 1. Почему капиллярные явления наблюдаются только в узких трубках?
2. От каких параметров зависит высота поднятия жидкости в капиллярных трубках?

§ 7.8. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задачи на материал данной главы отличаются от обычных задач на гидростатику лишь тем, что в них принимается во внимание ещё одна сила — сила поверхностного натяжения, определяемая формулой (7.4.3).

Для решения задач используются также формулы для поверхностной энергии (7.3.2), давления под изогнутой поверхностью (7.6.6) и высоты поднятия жидкости в капилляре (7.7.3).

Задача 1

Определите энергию, освободившуюся при слиянии мелких капель воды радиусом $r = 2 \cdot 10^{-3}$ мм в одну большую каплю радиусом $R = 2$ мм. Считать, что при слиянии мелких капель температура не изменяется. Поверхностное натяжение воды равно $\sigma = 7{,}4 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

Решение. Обозначим число мелких капель через n. Тогда общая поверхность всех мелких капель

$$S_1 = 4\pi r^2 n.$$

Поверхность одной большой капли

$$S_2 = 4\pi R^2.$$

Поверхностная энергия всех мелких капель

$$U_{п1} = \sigma \cdot 4\pi r^2 n,$$

а одной крупной капли

$$U_{п2} = \sigma \cdot 4\pi R^2.$$

Так как температура не изменялась, то кинетическая энергия молекул воды тоже не изменилась. Следовательно, выделение энергии произошло за счёт уменьшения потенциальной (поверхностной) энергии:

$$Q = U_{п1} - U_{п2} = 4\pi\sigma(r^2 n - R^2). \qquad (7.8.1)$$

Чтобы найти число капель n, учтём, что объём воды не изменился. Сумма объёмов мелких капель

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 n,$$

а объём большой капли

$$V_2 = \frac{4}{3}\pi R^3.$$

Так как $V_1 = V_2$, то

$$\frac{4}{3}\pi r^3 n = \frac{4}{3}\pi R^3.$$

Отсюда число мелких капель

$$n = \frac{R^3}{r^3}.$$

Подставляя это значение n в выражение (7.8.1), получим

$$Q = 4\pi R^2\sigma\left(\frac{R}{r} - 1\right) \approx 3{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

Задача 2

Смачиваемый водой кубик массой $m = 0{,}02$ кг плавает на поверхности воды. Ребро кубика имеет длину $a = 0{,}03$ м. На каком расстоянии x от поверхности воды находится нижняя грань кубика?

Решение. Архимедова сила уравновешивает силу тяжести кубика и силу поверхностного натяжения. Следовательно,

$$a^2 x\rho g - mg - 4a\sigma = 0. \qquad (7.8.2)$$

Отсюда

$$x = \frac{mg + 4a\sigma}{a^2\rho g} \approx 0{,}023 \text{ м.}$$

Силы поверхностного натяжения вносят поправку около 1 мм.

Задача 3

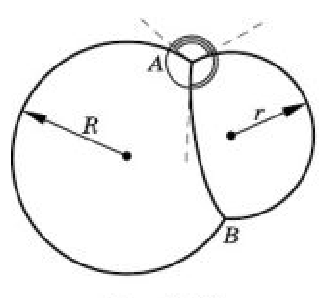


Рис. 7.29

Два мыльных пузыря радиусами R и r «срослись», как показано на рисунке 7.29. Какую форму примет плёнка, разделяющая оба пузыря? Какие углы образуются между плёнками в местах их соприкосновения?

Решение. Давление внутри мыльного пузыря радиусом R больше атмосферного давления на величину $\frac{4\sigma}{R}$, а внутри меньшего пузыря — на величину $\frac{4\sigma}{r}$. В этих выражениях учтено, что у мыльного пузыря две поверхности.

Давление внутри пузыря радиусом R вместе с давлением участка плёнки между пузырями должно уравновесить давление внутри меньшего пузыря. Следовательно,

$$\frac{4\sigma}{R} + \frac{4\sigma}{R_x} = \frac{4\sigma}{r},$$

где R_x — радиус кривизны участка плёнки AB. Отсюда

$$R_x = \frac{Rr}{R - r}.$$

Силы поверхностного натяжения в любой точке поверхности соприкосновения пузырей уравновешивают друг друга и равны между собой. А это возможно только в том случае, когда углы между векторами сил равны 120°.

Задача 4

Длинную стеклянную капиллярную трубку, радиус канала которой $r = 1$ мм, закрыли снизу и наполнили водой. Трубку поставили вертикально и открыли её нижний конец, при

этом часть воды вылилась. Какова высота столба оставшейся в капилляре воды?

Решение. Столб воды в поставленной вертикально трубке удерживается верхним и нижним менисками (рис. 7.30). Давление в точке B под верхним мениском

$$p_B = p_0 - \frac{2\sigma}{r}, \qquad (7.8.3)$$

а давление в точке C над нижним мениском

$$p_C = p_B + \rho g h. \qquad (7.8.4)$$

Рис. 7.30

С другой стороны,

$$p_C = p_0 + \frac{2\sigma}{r}. \qquad (7.8.5)$$

Следовательно,

$$p_0 + \frac{2\sigma}{r} = p_B + \rho g h = p_0 - \frac{2\sigma}{r} + \rho g h$$

или

$$\frac{4\sigma}{r} = \rho g h. \qquad (7.8.6)$$

Отсюда

$$h = \frac{4\sigma}{\rho g r}.$$

Задача 5

Конец капиллярной трубки опущен в воду. Какое количество теплоты Q выделится при поднятии жидкости по капилляру? Краевой угол принять равным нулю (полное смачивание).

Решение. Жидкость поднимается согласно формуле (7.7.3) на высоту $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$. Потенциальная энергия столбика жидкости в поле тяготения Земли

$$E_p = \frac{mgh}{2} = \frac{2\pi\sigma^2}{\rho g},$$

так как

$$m = \pi r^2 h \rho.$$

Силы поверхностного натяжения совершают работу

$$A = 2\pi r h\sigma = \frac{4\pi\sigma^2}{\rho g}.$$

На увеличение потенциальной энергии E_p идёт половина этой работы. Следовательно, выделение теплоты происходит за счёт другой половины. Таким образом,

$$Q = \frac{2\pi\sigma^2}{\rho g}.$$

Задача 6

Капиллярная трубка погружена в воду таким образом, что длина непогружённой её части составляет $l = 0{,}2$ м. Вода поднялась в трубке на высоту $\frac{l}{2} = 0{,}1$ м. В этом положении верхний конец трубки закрывают пальцем и трубку погружают в воду до тех пор, пока уровень воды в ней не сравняется с уровнем воды в сосуде. Найдите длину выступающей из воды части трубки в этом положении. Внешнее давление $p_0 = 10^5$ Па.

Решение. Согласно формуле (7.7.3)

$$\frac{l}{2} = \frac{2\sigma}{\rho g r}. \qquad (7.8.7)$$

Найдём давление воздуха, которое установится в погружённом закрытом сверху капилляре после выравнивания уровней воды (в сосуде и капилляре). Обозначим давление воздуха в капилляре буквой p, тогда под вогнутой поверхностью воды в капилляре давление равно $p - \frac{2\sigma}{r}$ (см. § 7.6). Так как жидкость в капилляре и сосуде находится в равновесии, то давление на жидкость в сосуде (атмосферное давление p_0) равно давлению $p - \frac{2\sigma}{r}$:

$$p_0 = p - \frac{2\sigma}{r}.$$

Откуда

$$p = p_0 + \frac{2\sigma}{r}. \qquad (7.8.8)$$

Полагая температуру неизменной и применив закон Бойля—Мариотта, получим

$$ph = p_0\frac{l}{2}. \qquad (7.8.9)$$

Отсюда

$$h = \frac{l}{2}. \quad (7.8.10)$$

Найдём из уравнения (7.8.7) значение σ и подставим его в выражение (7.8.8):

$$p = p_0 + \frac{\rho g l}{2}. \quad (7.8.11)$$

И наконец, подставив в (7.8.10) выражение (7.8.11) для p, окончательно получим

$$h = \frac{p_0 l}{2p_0 + \rho g l} \approx 9{,}9 \text{ см}.$$

Упражнение 6

1. Какую работу надо совершить, чтобы выдуть мыльный пузырь диаметром $D = 12$ см? Поверхностное натяжение мыльного раствора считать равным $4 \cdot 10^{-2}$ Н/м.
2. Каким усилием можно оторвать тонкое металлическое кольцо от мыльного раствора ($\sigma = 4 \cdot 10^{-2}$ Н/м), если диаметр кольца 15,6 см, масса 7,0 г и кольцо соприкасается с раствором по окружности?
3. Каким образом, используя явления смачивания и несмачивания, можно осуществить минимальный и максимальный термометры?
4. При удалении с поверхности ткани жирного пятна рекомендуется смачивать пропитанной бензином ваткой края пятна. Смачивать бензином сразу само пятно не следует. Почему?
5. Чтобы мазь лучше впитывалась в смазанные лыжные ботинки, их нагревают. Как нужно нагревать ботинки — снаружи или изнутри?
6. Почему с помощью утюга можно вывести пятно жира с костюма?
7. Почему при сушке дров на солнце на конце полена, находящемся в тени, выступают капельки воды?
8. На сколько давление воздуха внутри мыльного пузыря больше атмосферного давления, если диаметр пузыря $D = 10$ мм? Поверхностное натяжение мыльного раствора $\sigma = 4 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

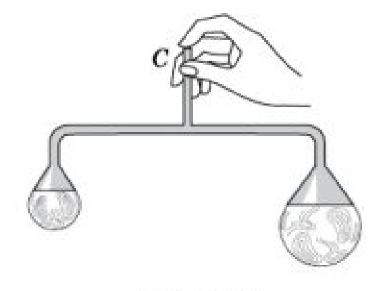


Рис. 7.31

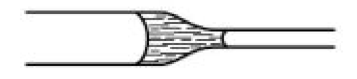


Рис. 7.32

9. Из трубки с раструбами на концах выдули два мыльных пузыря (рис. 7.31), после чего закрыли пальцем трубку C. Будет ли воздух переходить из одного пузыря в другой? До каких пор?
10. В носик стеклянной трубки от пипетки (рис. 7.32) попадает капля воды. В какую сторону при этом устремляется капля — к широкому или узкому концу трубки? Почему?
11. В дне чайника имеется круглое отверстие диаметром 0,1 мм. До какой высоты можно налить воду в чайник, чтобы она не выливалась через отверстие? Сохранится ли это условие, если воду в чайнике нагревать?
12. Конец стеклянной капиллярной трубки радиусом $r = 0{,}05$ см опущен в воду на глубину $h = 2$ см. Какое давление необходимо, чтобы выдуть пузырёк воздуха через нижний конец трубки?
13. Смачивающая жидкость плотностью ρ поднялась в капиллярной трубке на высоту h. Каково давление в жидкости внутри капилляра на высоте $h/4$? Атмосферное давление равно p_0.
14. Докажите, что в случае неполного смачивания ($\theta \neq 0$) высота поднятия жидкости в вертикальной капиллярной трубке вычисляется по формуле $h = \dfrac{2\sigma\cos\theta}{r\rho g}$, где θ — краевой угол, r — радиус канала трубки и ρ — плотность жидкости. Как изменится формула $h = \dfrac{2\sigma\cos\theta}{r\rho g}$, если сосуд с жидкостью будет установлен в лифте, движущемся с ускорением a, направленным вверх; направленным вниз?
15. Длинную капиллярную трубку радиусом 0,8 мм заполнили водой и перевели в вертикальное положение. Найдите массу жидкости, оставшейся в трубке после того, как часть воды вылилась.

16. В капиллярной трубке, опущенной вертикально в воду на глубину l, вода поднялась на высоту h (рис. 7.33). Нижний конец трубки закрывают, вынимают её из воды и снова открывают. Определите длину столбика воды, оставшейся в трубке.

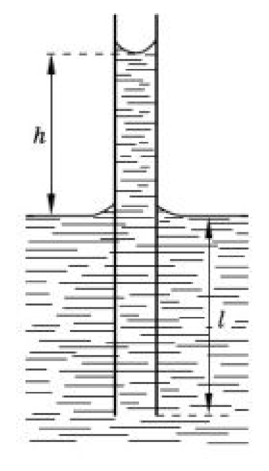


Рис. 7.33

17. Стеклянная капиллярная трубка, внутренний диаметр которой $d = 0{,}5$ мм, погружена в воду. Верхний конец трубки выступает на $h = 2$ см над поверхностью воды. Какую форму имеет мениск? Чему равен его радиус кривизны?

18. Капиллярная стеклянная трубка имеет радиус канала $r = 0{,}05$ см и запаяна сверху. Трубка открытым концом опускается вертикально в воду. Какой длины следовало бы взять трубку, чтобы при этих условиях вода в ней поднялась на высоту $h = 1$ см? Давление воздуха $p_0 = 10^5$ Па. Поверхностное натяжение воды $\sigma = 7 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

19. Каким образом можно без потерь налить жидкость в сосуд, находясь в условиях невесомости (на космическом корабле)? Как в этих условиях извлечь жидкость из сосуда?

20. Великому датскому физику Н. Бору довелось однажды мыть посуду в горной альпийской хижине. Он был крайне удивлён, увидев, что можно получить чистую посуду с помощью небольшого количества грязной воды и грязной тряпки. В чём здесь дело?

---

1. Сделайте фотоальбом явлений, вызванных поверхностным натяжением.
2. Подготовьте доклад «Смачивание: значение в промышленности, быту, природе».
3. Выделите общее и различное в следующих словосочетаниях: «мениск жидкости» и «мениск в анатомии». Результат представьте в виде таблицы.
4. Сделайте презентацию «Капиллярные явления в природе, быту и технике».
5. Подготовьте доклад «Капилляры человека».

Глава 8

ТВЁРДЫЕ ТЕЛА И ИХ ПРЕВРАЩЕНИЕ В ЖИДКОСТИ

§ 8.1. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕЛА

Мы живём на поверхности твёрдого тела — земного шара, в сооружениях, построенных из твёрдых тел, — домах. Наше тело, хотя и содержит приблизительно 65% воды (мозг — 80%), тоже твёрдое. Орудия труда, машины также сделаны из твёрдых тел. Знать свойства твёрдых тел жизненно необходимо.

В § 2.6 было кратко описано молекулярное строение твёрдых кристаллических тел. Теперь мы рассмотрим подробнее их свойства и строение.

Кристаллы

Если рассматривать при помощи лупы или микроскопа крупинки сахара, соли, медного купороса, нафталина и т. п., то можно заметить, что они ограничены плоскими, как бы шлифованными гранями. Наличие таких естественных граней является признаком нахождения вещества в кристаллическом состоянии. **Кристаллом* называется тело определённой геометрической формы, ограниченное естественными плоскими гранями.**

Монокристаллы и поликристаллические тела

Тело, представляющее собой один кристалл, называется монокристаллом.

* От греческого слова krýstallos — буквально: лёд.

На рисунке 8.1 изображён крупный монокристалл кварца (горного хрусталя). Маленькая крупинка сахарного песка тоже является монокристаллом. Соблюдая большие предосторожности, можно вырастить металлический монокристалл больших размеров.



Рис. 8.1

Большинство кристаллических тел состоит из множества беспорядочно расположенных и сросшихся между собой мелких кристалликов. Такие тела называются поликристаллическими. Поликристаллическими являются все металлы и минералы. Кусок сахара тоже поликристаллическое тело.

Форма и размеры кристаллов

Кристаллы различных веществ имеют разнообразную форму. На рисунке 8.2 изображены кристаллы каменной соли *1*, берилла *2*, алмаза *3*, граната *4*, кварца *5*, турмалина *6*, изумруда *7* и кальцита *8*. Один из видов кристаллов льда, образующих причудливые формы снежинок (рис. 8.3), представляет собой правильную шестиугольную призму (рис. 8.4).

Размеры кристаллов тоже разнообразны. Одни кристаллы крупны и легко различимы невооружённым глазом, другие же настолько малы, что могут быть рассмотрены только в микроскоп.

Размеры кристаллов поликристаллического типа могут с течением времени изменяться. Так, мелкие кристаллы железа и стали переходят в крупные. Этот переход ускоряется

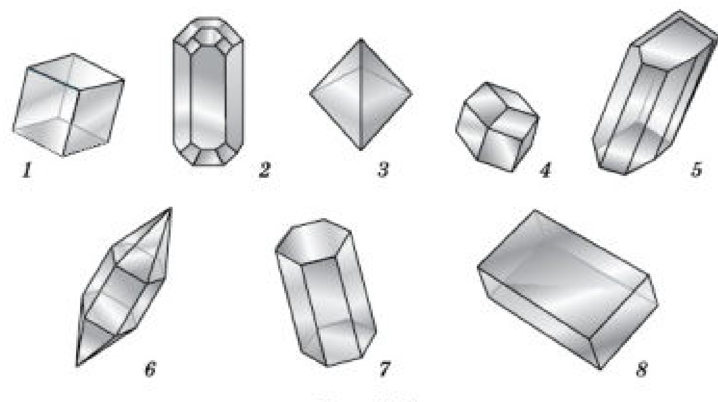


Рис. 8.2

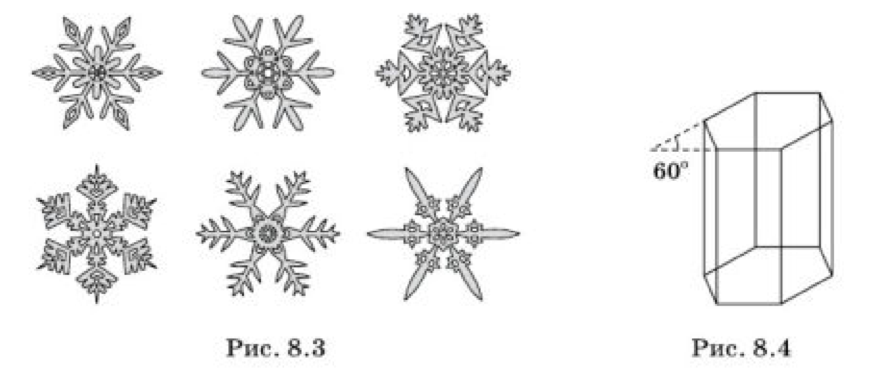


Рис. 8.3 Рис. 8.4

при ударах и сотрясениях. Он постоянно происходит в железнодорожных рельсах, вагонных осях, стальных мостах, отчего прочность этих сооружений с течением времени уменьшается.

Полиморфизм



Очень многие тела одинакового химического состава в кристаллическом состоянии в зависимости от условий могут существовать в двух или более разновидностях (модификациях). Это свойство называется полиморфизмом (многоформностью). У льда, например, известно до десяти различных модификаций, которые получают в лабораториях. В природе же встречается только один вид (см. рис. 8.4).

Особо важное значение для техники имеет полиморфизм углерода — углерод кристаллизуется в двух модификациях: графит и алмаз. Графит — мягкий материал матово-чёрного цвета. Из него, например, изготавливают грифели карандашей. Алмаз совершенно не похож на графит. Это прозрачный и очень твёрдый кристалл. При температуре около 150 °С (при нагревании в вакууме) алмаз превращается в графит. Чтобы графит превратить в алмаз, его нужно нагреть до 2000 °С под давлением 10^{10} Па. В настоящее время освоено промышленное производство искусственных алмазов. Искусственные алмазы широко используются в различных режущих инструментах.

Анизотропия кристаллов

Существенным свойством монокристалла является анизотропия* — неодинаковость его свойств (механических,

* От греческих слов anisos — «неравный», tropos — «поворот, направление».

тепловых, электрических и т. д.) по различным направлениям. Например, если кристаллы поваренной соли, имеющие кубическую форму, раскалывать, то мелкие осколки будут иметь преимущественно форму прямоугольных параллелепипедов. Это значит, что в направлениях, параллельных граням, прочность кристалла поваренной соли гораздо меньше, чем в диагональных и других направлениях.

Кусок слюды легко расслаивается в одном из направлений на тонкие пластинки (рис. 8.5). Расслоить его в направлении, перпендикулярном пластинкам, гораздо труднее. Также легко расслаивается в одном направлении кристалл графита.

Если грань кристалла, например кварца, покрыть тонким слоем парафина и прикоснуться к нему раскалённой иглой, то парафин начнёт плавиться. Расплавленный парафин имеет форму не круга, а эллипса (рис. 8.6), что указывает на различие теплопроводности кристалла по разным направлениям. О неодинаковости теплового расширения кристалла по разным направлениям можно заключить из следующего опыта. Если из монокристалла, например кварца, изготовить тело шарообразной формы и нагреть его, то после нагревания оно уже не будет шаром. Вдоль трёх взаимно перпендикулярных диаметров тело расширится неодинаково и вместо шара получится так называемый эллипсоид (рис. 8.7).

Поликристаллические тела *изотропны**, т. е. обнаруживают одинаковые свойства по разным направлениям. Это объясняется тем, что кристаллики, из которых состоит поликристаллическое тело, ориентированы друг по отношению к другу хаотически. В результате ни одно из направлений не отличается от других.

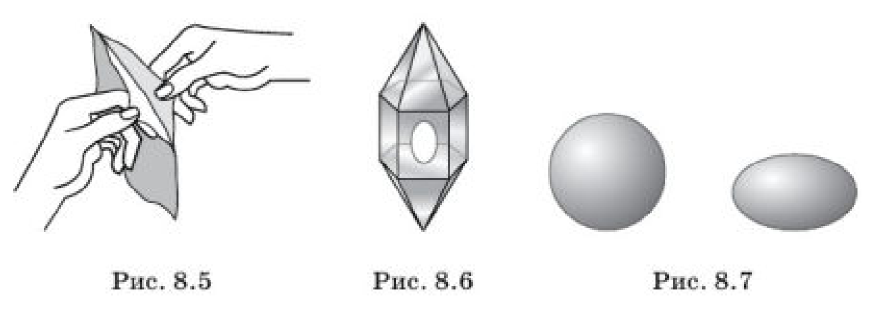


Рис. 8.5 Рис. 8.6 Рис. 8.7

* От греческих слов isos — «равный», tropos — «поворот, направление».

Большинство кристаллических тел — поликристаллы, так как они состоят из множества сросшихся кристалликов. Одиночные кристаллы — монокристаллы имеют правильную геометрическую форму, и их свойства различны по разным направлениям (анизотропия).

1. Какие тела называют кристаллами?
2. Чем отличаются монокристаллы от поликристаллов?
3. Определите понятия «анизотропия» и «изотропия» кристаллов.

§ 8.2. КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕШЁТКА

Правильность внешней формы твёрдых (кристаллических) тел обусловлена тем, что частицы (атомы, молекулы), из которых эти тела состоят, расположены относительно друг друга в определённом порядке, на строго определённых расстояниях друг от друга (см. гл. 2).

Вследствие теплового движения расстояния между частицами несколько меняются, так как они совершают колебания около определённых точек — положений равновесия частиц. Именно эти точки (они называются у з л а м и) и расположены в определённом порядке.

В § 2.6 было введено понятие о кристаллической решётке как о пространственной решётке, которая получается, если узлы соединить прямыми линиями.

В пространственной решётке можно выделить наименьший фрагмент, повторением которого можно образовать всю решётку. Этот наименьший фрагмент называется элементарной ячейкой решётки. Так, элементарной ячейкой пространственной решётки кристалла криптона является куб (рис. 8.8). Длина ребра элементарной ячейки называется п е р и о д о м к р и с т а л л и ч е с к о й р е ш ё т к и. (Длины рёбер элементарной ячейки могут быть различными по разным направлениям.) В монокристалле криптона такая ячейка повторяется много раз с неизменной ориентацией. На этом основании говорят, что в кристалле наблюдается дальний порядок в расположении атомов или других частиц (ионов, молекул и т. п.), из которых построен кристалл. Образно это можно себе представить так.

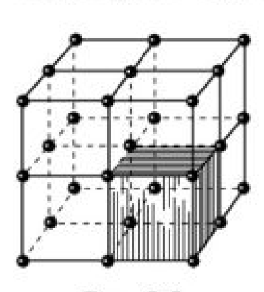


Рис. 8.8

Человек, уменьшенный до размеров атома, нашёл бы, что путешествие в кристалле весьма однообразно. Перепрыгивая с атома на атом в каком-либо определённом направлении, он совершал бы прыжки одинаковой длины; расположение атомов справа и слева, над ним и под ним оставалось бы одним и тем же. Изменяя направление своего движения, человек быстро установил бы различие воспринимаемых картин. Он обнаружил бы, что расстояние между атомами изменилось, изменилось и их положение. Однако и новая картина повторялась бы до тех пор, пока он вновь не сменил бы направление перемещения.

Четыре типа кристаллов

Алмаз и парафиновая свеча... Алмаз — символ твёрдости; парафин, подобно воску, мягок и податлив. Сразу можно подумать, что полярности свойств соответствует полярность сочленения в единое целое тех отдельных элементов, из которых состоят эти вещества.

Подумав так, вы не ошибётесь. Парафин состоит из отдельных молекул, связанных друг с другом силами Ван-дер-Ваальса (см. § 2.4). Кристалл алмаза можно рассматривать как одну гигантскую молекулу. Силы молекулярного притяжения значительно слабее химических сил, и соответственно парафин не идёт ни в какое сравнение по твёрдости с алмазом.

Существует четыре типа кристаллов: молекулярные, ковалентные (или атомные), ионные и металлические.

Во всех типах кристаллов образующие их частицы (молекулы, атомы, ионы) располагаются таким образом, что их энергия оказывается минимальной. При таком расположении частиц внутри кристалла они образуют устойчивую систему.

Молекулярные кристаллы

К молекулярным кристаллам относятся кристаллы водорода, аргона, азота, брома, нафталина и др. Сухой лёд (твёрдая углекислота) и многие органические вещества также являются молекулярными кристаллами. Прочность всех этих кристаллов невелика.

На рисунке 8.9 изображён молекулярный кристалл аргона. В отличие от изображений кристаллической решётки на рисунках 2.25 и 2.26, здесь атомы изображены не точками,

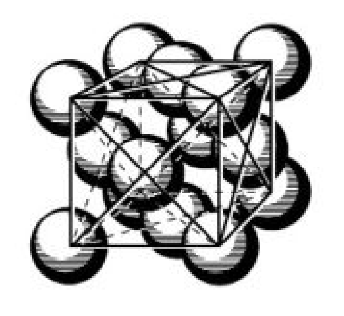


Рис. 8.9

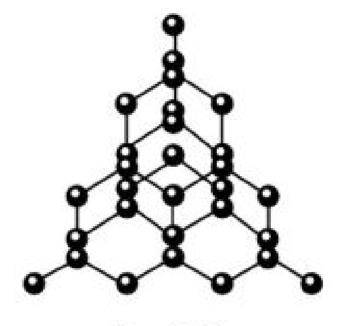


Рис. 8.10

а сферами. Кристалл имеет гранецентрированную кубическую структуру: в каждой элементарной ячейке атомы расположены в вершинах куба и в центрах его граней.

Ковалентные кристаллы

К ковалентным кристаллам относятся алмаз, полупроводники кремний и германий, а также многие соединения: сульфид цинка, оксид бериллия и др.

В алмазе число ближайших соседей каждого атома углерода равно его валентности, т. е. четырём. Атом располагается симметрично в центре группы из четырёх одинаковых атомов, которые лежат в вершинах тетраэдра (рис. 8.10). Тетраэдр — фигура жёсткая; его конфигурацию не изменишь, не деформируя его рёбер. Куб же, к примеру, легко деформировать в параллелепипед, не меняя размеров рёбер. Этим, а также малыми межатомными расстояниями (0,154 нм) объясняются свойства алмаза, в частности его уникальная твёрдость.

Любые два соседних атома налаживают между собой ковалентную (парноэлектронную) связь, выделяя для этого по одному электрону. Но не надо думать, что коллективизированная пара принадлежит лишь двум атомам. От атома к соседям ведут четыре «тропинки» (связи), и данный валентный электрон может двигаться по любой из них. Дойдя до соседнего атома, он может перейти к следующему и блуждать по тропинкам-связям вдоль всего кристалла. Коллективизированные электроны принадлежат всему кристаллу в целом, и поэтому такой кристалл — это, в сущности, колоссальная молекула.

Ковалентные связи алмаза очень прочны и не рвутся с увеличением энергии колебаний атомов, т. е. с ростом температуры. Поэтому алмаз не проводит электрический ток. Уча-

ствующие в связи атомов валентные электроны привязаны к кристаллической решётке, и внешнее электрическое поле не оказывает заметного влияния на их движение. Кристаллы кремния и германия подобны кристаллу алмаза, но у них парноэлектронные связи не столь прочны. Небольшое нагревание вызывает разрыв отдельных связей. Электроны покидают проторенные тропы и обретают свободу. Во внешнем электрическом поле они перемещаются между узлами решётки, образуя электрический ток. Подобного рода вещества называются полупроводниками. Подробно об этом будет рассказано в «Электродинамике».

Ионные кристаллы

Коллективизация валентных электронов связывает также атомы ионных кристаллов. К их числу относятся неорганические соединения NaCl, AgBr и др. Но в ионных кристаллах, например в кристалле поваренной соли, коллективизация электронов, в сущности, сводится к экспроприации хлором одного электрона у натрия. Все валентные электроны движутся по узлам решётки, занятым хлором, и кристалл фактически состоит из ионов противоположных знаков. Связь в этом случае обеспечивается электростатическими силами притяжения.

Металлические кристаллы

При образовании куска металла из отдельных атомов валентные электроны полностью утрачивают связь со своими атомами и становятся «собственностью» всего куска в целом. Положительные ионы окружены «электронным газом», образованным коллективизированными электронами. Этот газ заполняет все промежутки между ионами и стягивает их электрическими силами.

В ковалентных кристаллах коллективизированные электроны циркулируют по строго определённым путям. В металле же электроны оказываются свободными и могут перемещаться по всему куску в любых направлениях. Это проявляется, например, в том, что металлы хорошо проводят электрический ток, в то время как ковалентные кристаллы в большинстве случаев являются изоляторами или полупроводниками.

Очень слабая связь валентных электронов металла с атомами — вот причина той относительной свободы, которую имеют электроны внутри металлов. У ковалентных кристаллов эта связь значительно прочнее.

На рисунке 8.11 изображена элементарная ячейка кристалла натрия. Она имеет объёмно-центрированную кубическую структуру: положительные ионы натрия располагаются в вершинах куба и в его центре.

Итак, только в молекулярных кристаллах связь осуществляется силами Ван-дер-Ваальса. В остальных твёрдых телах в той или иной форме происходит коллективизация электронов.

Строение кристалла объясняет его свойства

Мы говорили, что кристалл ограничен плоскими гранями и прямыми рёбрами. Этот факт можно объяснить тем, что плоскости и рёбра кристалла всегда проходят через узлы пространственной решётки.

Можно понять, почему кристаллы одного и того же вещества могут существовать в нескольких модификациях (полиморфизм). Это объясняется разным строением пространственной решётки. На рисунках 8.10 и 8.12 изображены кристаллические решётки двух модификаций углерода: алмаза и графита. Представление о внутреннем строении кристалла позволяет легко объяснить наличие анизотропии его свойств.

Рассмотрим в качестве примера строение кристалла графита. Из рисунка 8.12 видно, что атомы углерода в кристалле графита располагаются в плоскостях, которые отстоят на определённых расстояниях друг от друга. Расстояния между атомами в плоскости в 2,5 раза меньше, чем расстояния между плоскостями. Поэтому атомы разных плоскостей связаны друг с другом слабее, чем атомы в одной плоскости. Отсюда следует, что разрушить кристалл так, чтобы плоскость разрыва была параллельна атомным плоскостям, легче, чем по какому-либо другому направлению. Действитель-

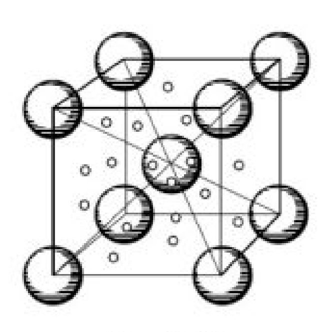


Рис. 8.11

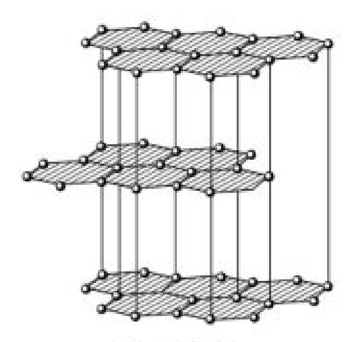


Рис. 8.12

но, кристаллы графита легко разрушаются (расслаиваются) благодаря тому, что атомы разных плоскостей скользят относительно друг друга. Когда мы пишем карандашом, такое расслоение происходит непрерывно и тонкие слои графита остаются на бумаге.

Аналогично объясняется анизотропия других свойств.

Существует четыре типа кристаллов: ковалентные, ионные, металлические и молекулярные. Тип кристалла определяется характером взаимодействия атомов и молекул, образующих кристалл.

? 1. Какую структуру образуют частицы, из которых состоит твёрдое тело?

2. Перечислите четыре типа кристаллов.

§ 8.3. АМОРФНЫЕ ТЕЛА

Не все твёрдые тела — кристаллы. Существует множество аморфных тел. Чем они отличаются от кристаллов?*

Тепловые, электрические и оптические свойства аморфных тел одинаковы по всем направлениям: аморфные тела изотропны. Признаком аморфного тела является неправильная форма поверхности при изломе. Кристаллы же при изломе дают плоские (или ступенчатые) поверхности.

В зависимости от условий отвердевания расплава (например, в зависимости от режима его охлаждения) в аморфном состоянии могут оказаться и такие вещества, которые обычно имеют кристаллическую структуру. Так, кристалл кварца, если его расплавить (это происходит при температуре около 1700 °C), при быстром охлаждении образует так называемый плавленый кварц. Этот кварц имеет меньшую плотность, чем кристаллический, и обладает одинаковыми свойствами по всем направлениям.

Сходство аморфных тел с жидкостями

Аморфные тела мы считаем твёрдыми, так как они, подобно кристаллическим телам, сохраняют свою форму. Однако по прошествии более или менее длительного промежут-

* От греческого слова amorphos — «бесформенный».

ка времени аморфные тела всё же изменяют свою форму под действием, например, силы тяжести. Это делает их похожими на жидкости. Так, длинная стеклянная трубка, положенная на опоры, в конце концов под действием силы тяжести прогибается. Куски вара* в воронке с течением времени очень медленно просачиваются в отверстие воронки и выходят из неё в виде стержня. Если на дно сосуда положить пробку, на неё кусочки вара, а сверху на вар положить кусок свинца, то через достаточно большой промежуток времени куски вара сольются в сплошное тело с горизонтальной поверхностью, свинец опустится на дно, а пробка всплывёт на поверхность. При повышении температуры такие изменения формы происходят быстрее. Таким образом, вар можно рассматривать как очень вязкую жидкость.

Переход аморфных тел в кристаллические

Аморфное состояние неустойчиво, и рано или поздно вещество из аморфного состояния переходит в кристаллическое. По прошествии более или менее длительного промежутка времени в аморфном стекле под влиянием ударных нагрузок образуются мелкие кристаллы — стекло мутнеет. Аморфный стекловидный сахарный леденец засахаривается — покрывается кристаллами сахара и т. д.

Иногда переход вещества из аморфного состояния в кристаллическое происходит достаточно быстро. Так, аморфная пластическая сера обретает кристаллические свойства за несколько часов. С другой стороны, археологи обнаруживают стеклянные украшения, не изменившие своего вида за несколько сотен лет.

Ближний порядок

В аморфных телах слагающие его частицы не имеют определённого расположения по всему объёму тела, как в кристалле. В расположении атомов (молекул) аморфного тела наблюдается беспорядок. Только ближние атомы — соседи располагаются в относительном порядке. Но строгой повторяемости во всех направлениях одного и того же элемента структуры, которая характерна для кристаллов, в аморфных телах нет. Наблюдается лишь так называемый ближний порядок. На рисунке 8.13, *а* схематически изображён фрагмент кристаллической решётки кварца — совокупность правильных шестиугольников. Для сравнения на рисун-

* *Вар* — легкоплавкое смолистое вещество.

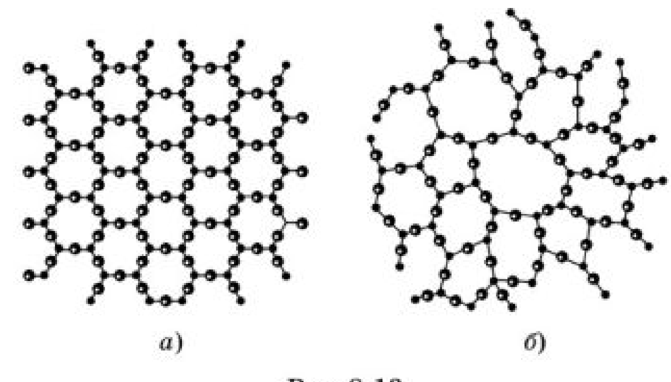


Рис. 8.13

ке 8.13, *б* изображена решётка аморфного кварца. Решётка имеет неправильную форму: наряду с шестиугольниками встречаются пяти- и семиугольники и т. д.

Объяснение свойств аморфных тел

Беспорядок в расположении атомов аморфных тел приводит к тому, что средние расстояния между атомами по разным направлениям оказываются одинаковыми. Поэтому аморфные тела изотропны.

Сходство аморфных тел с жидкостями объясняется тем, что атомы и молекулы аморфных тел, подобно молекулам жидкости, имеют определённое время «оседлой» жизни — конечное время колебаний около положения равновесия. Но в отличие от жидкостей это время велико. В этом отношении аморфные тела близки к кристаллическим, так как перескоки атомов из одного положения в другое происходят редко.

По мере повышения температуры аморфные тела постепенно размягчаются. Это происходит потому, что с ростом температуры учащаются перескоки атомов из одного положения равновесия в другое. Определённой температуры плавления у аморфных тел в отличие от кристаллических нет. Поэтому аморфные твёрдые тела можно рассматривать как переохлаждённые жидкости с очень большой вязкостью.

Упорядоченному расположению атомов кристаллических тел соответствует минимум потенциальной энергии, когда атомы сближаются на минимально возможные расстояния. Отсутствие дальнего порядка в расположении атомов аморфных тел приводит к тому, что вещество в аморфном состоянии имеет меньшую плотность, чем в кристаллическом. И этому состоянию соответствует большая потенциальная энергия взаимодействия. Вот почему аморфное состояние

неустойчиво и вещество из аморфного состояния переходит в кристаллическое. Течение процессов в природе направлено в сторону уменьшения энергии.

Образование аморфного вещества из расплава при быстром охлаждении связано с тем, что за это время молекулы (или атомы) не успевают выстроиться в строгом порядке (процесс кристаллизации может требовать много времени) и образовать кристаллическую решётку. Однако для большинства веществ даже быстрого охлаждения недостаточно, чтобы помешать образованию кристаллов. Эти вещества существуют только в кристаллическом состоянии.

Аморфные твёрдые тела занимают промежуточное положение между кристаллическими твёрдыми телами и жидкостями. Их атомы или молекулы располагаются в относительном порядке.

? 1. Какие твёрдые тела, кроме кристаллических, существуют в природе? Приведите примеры таких тел и опишите их основной признак.
2. Какова структура аморфных тел?
3. Как можно объяснить свойства аморфных тел?

§ 8.4. ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

Существуют необычные вещества, которые совмещают в себе свойства кристаллического твёрдого тела и жидкости. Эти вещества называются жидкими кристаллами. Подобно жидкостям, они текучи. Но в то же время они, подобно кристаллам, обладают анизотропией. Главным для жидких кристаллов является анизотропия оптических свойств.

О существовании жидких кристаллов известно уже почти 100 лет. Но очень долгое время они рассматривались как курьёз, не заслуживающий пристального внимания и изучения. Лишь несколько десятков лет назад началось детальное исследование этих веществ. С одной стороны, они нашли важные технические применения, а с другой — выяснилось, что жидкие кристаллы весьма распространены в природе. Они входят также в состав многих живых тканей.

Молекулы жидких кристаллов

Молекулы жидких кристаллов — это молекулы органических соединений, имеющие вытянутую сигарообразную форму. Строение их таково, что концы молекул очень слабо вза-

имодействуют друг с другом. Боковые же поверхности взаимодействуют достаточно сильно и могут прочно удерживать молекулы в едином ансамбле, в то время как концевые связи разорваны.

Жидкие кристаллы существуют в определённом для каждого вещества интервале температур. У одних веществ этот интервал невелик ($\Delta T \approx 0{,}01$ К), у других довольно широк ($\Delta T \approx 100$ К). Если жидкий кристалл нагреть, то он при некоторой температуре превращается в обычную жидкость, если охладить, то становится обыкновенным кристаллом.

В зависимости от характера ориентации осей молекул жидкие кристаллы подразделяются на три типа: *нематические*, *смектические* и *холестерические*.

Нематические жидкие кристаллы

Наименее упорядоченной структурой обладают нематические кристаллы (от греч. «нема» — нить; эти вещества включают микроскопические нитевидные структуры).

Длинные оси молекул нематических кристаллов параллельны друг другу, и в этом отношении вещество обнаруживает дальний порядок, подобно кристаллам. Но центры тяжести молекул расположены хаотически, и в их расположении обнаруживается лишь ближний порядок (рис. 8.14). Представьте себе длинную коробку, заполненную спичками. Спички могут смещаться вверх и вниз, но не могут переворачиваться, так что их оси остаются параллельными длинной оси коробки. Это и есть грубая модель нематического кристалла.

Оптические свойства такого кристалла вдоль направления осей молекул и перпендикулярно им различны. Под действием электрических и магнитных полей ориентация осей молекул изменяется.

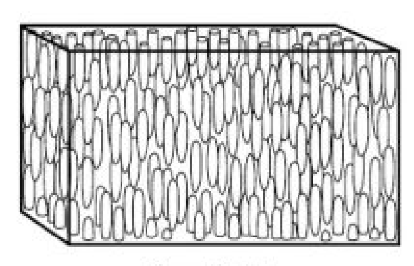


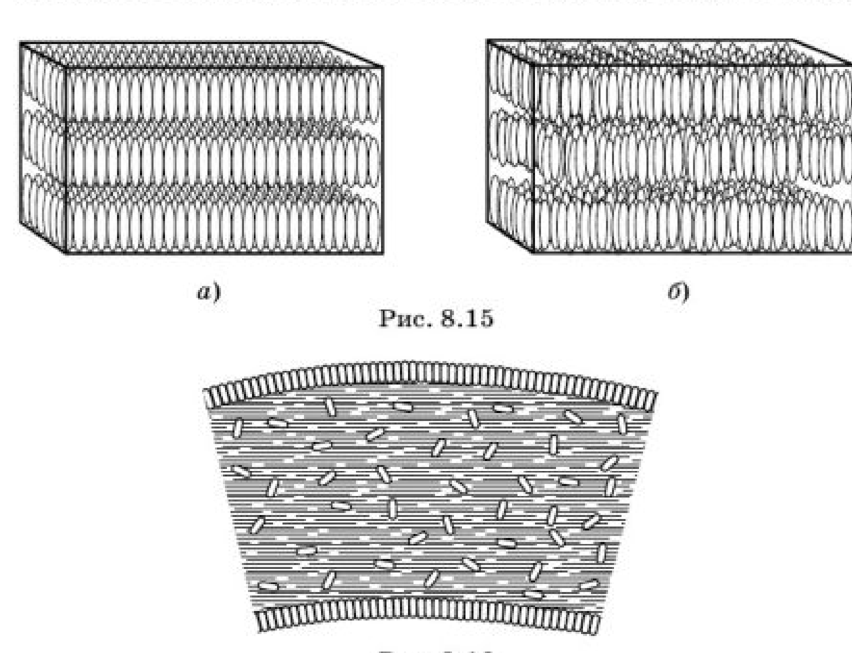
Рис. 8.14

Смектические жидкие кристаллы

Наиболее упорядочены смектические жидкие кристаллы. Оси их молекул также параллельны, но образуют набор слоёв. У некоторых смектических веществ молекулы упорядочены и внутри каждого слоя: центры их тяжести располагаются на прямых линиях (рис. 8.15, *а*). В других же веществах молекулы в слоях располагаются беспорядочно (рис. 8.15, *б*). В любом случае оси молекул параллельны друг другу и перпендикулярны плоскости слоя, толщина которого равна длине молекулы.

У всех смектиков независимо от деталей структуры взаимодействие между слоями молекул гораздо слабее взаимодействия молекул внутри одного слоя. Поэтому слои могут легко скользить друг относительно друга, и смектики на ощупь мылоподобны. Отсюда и их название (от греч. «смегма» — мыло).

Обыкновенный мыльный пузырь представляет собой жидкокристаллическое вещество (рис. 8.16). Внешняя и внутренняя поверхности пузыря, между которыми находится мыльный раствор, состоят из слоёв мыла. Притяжение молекул мыла в поверхностных слоях обеспечивает устойчивость мыльного пузыря. При увеличении радиуса пузыря свободные молекулы мыла из раствора переходят в жид-



а) *б*)

Рис. 8.15

Рис. 8.16

кость. Если пузырь сокращается, то, напротив, молекулы мыла выталкиваются из поверхностного слоя и переходят в раствор.

Холестерические* жидкие кристаллы

Эти жидкие кристаллы занимают промежуточное положение между нематическими и смектическими жидкими кристаллами.

Молекулы холестерических жидких кристаллов располагаются в слоях, как и молекулы смектических жидких кристаллов. Но в каждом слое центры молекул расположены беспорядочно, как у нематиков. Оси молекул параллельны плоскостям слоёв (рис. 8.17; направления осей показаны

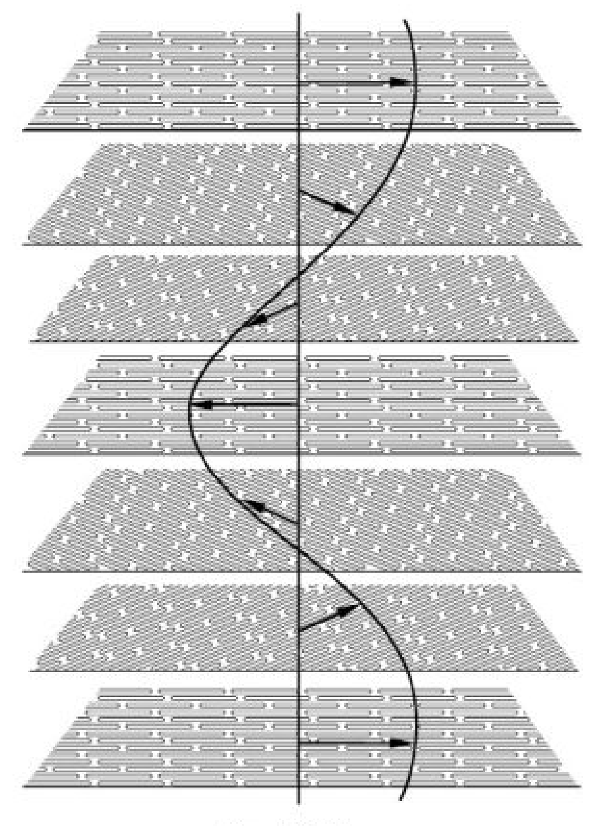


Рис. 8.17

* Название холестерические кристаллы получили из-за того, что их молекулярное строение характерно для большого числа соединений, содержащих холестерин.

стрелками). Из-за специфической формы молекул направление осей молекул в каждом слое незначительно повёрнуто относительно направления осей предшествующего слоя. В результате направления осей при перемещении от слоя к слою описывают спираль и примерно через 300 слоёв картина расположения осей молекул повторяется.

Существенно, что с изменением температуры углы, характеризующие повороты осей молекул от слоя к слою, изменяются. Это приводит к изменению условий отражения света от кристалла. В результате окраска кристалла при отражении белого света от холестерического кристалла зависит от температуры. При фиксированной температуре данное вещество имеет определённый цвет.

Применение жидких кристаллов

Зависимость цвета холестерических жидких кристаллов от температуры используется в медицине. С их помощью можно непосредственно наблюдать распределение температуры по поверхности человеческого тела. Это важно для выявления скрытых под кожей очагов воспалительных процессов. Для исследования изготовляют тонкую полимерную плёнку с микроскопическими полостями, заполненными холестериком. Наложение этой плёнки на поверхность тела даёт цветное изображение распределения температуры. Комнатные термометры на жидких кристаллах содержат слои в форме цифр различных холестериков, каждый из которых устойчив в достаточно узком интервале температур. Высвечивается цифра, соответствующая комнатной температуре.

Наиболее широкое применение жидкие кристаллы получили в буквенно-цифровых индикаторах электронных часов, микрокалькуляторов и т. д. Нужная цифра или буква воспроизводится с помощью комбинации небольших ячеек, выполненных в виде полосок (рис. 8.18). Каждая ячейка заполнена жидким кристаллом и имеет два электрода, на которые можно подавать напряжение. Электрическое поле меняет направление осей молекул, а это, в свою очередь, изменяет отражающие свойства ячейки. Индикатор работает только при освещении светом от внешнего источника. Индикаторы на жидких кристаллах можно делать чрезвычайно миниатюрными, и они потребляют мало энергии.

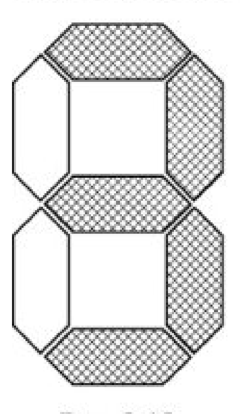


Рис. 8.18

В настоящее время жидкие кристаллы начинают применять в различного рода управляемых экранах, оптических затворах и для изготовления плоских телевизионных экранов.

Молекулы жидких кристаллов имеют удлинённую форму и располагаются так, что оси молекул параллельны либо во всём кристалле, либо в определённых его слоях. Широко применяются оптические свойства жидких кристаллов.

? Как называются вещества, совмещающие в себе свойства кристаллического твёрдого тела и жидкости? Перечислите три типа таких веществ.

§ 8.5. ДЕФЕКТЫ В КРИСТАЛЛАХ

Описывая строение кристаллов, мы до сих пор пользовались их идеальными моделями. Отличие реальных кристаллов от идеальных состоит в том, что реальные кристаллы не обладают правильной кристаллической решёткой. В них всегда встречаются нарушения строгой периодичности в расположении атомов. Эти нарушения называют д е ф е к т а м и в к р и с т а л л а х. Дефекты образуются в процессе роста кристаллов под влиянием теплового движения молекул, механических воздействий, облучения потоками частиц, из-за наличия примесей и пр.

Точечные дефекты

Дефекты, называемые точечными, возникают при замещении одного из атомов кристаллической решётки атомом примеси (рис. 8.19, *а*), внедрении атома между узлами решётки (рис. 8.19, *б*) или в результате образования вакансий — отсутствия атома в одном из узлов решётки (рис. 8.19, *в*).

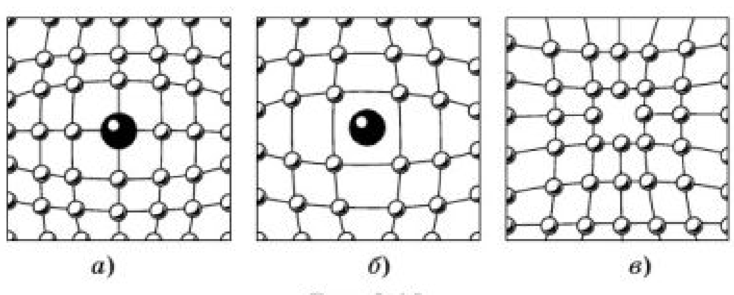


Рис. 8.19

Наличие точечных дефектов в кристалле сильно влияет на его свойства. Так, примеси в кристаллической решётке германия или кремния, составляющие всего лишь 0,1%, практически мало влияют на структуру кристалла, но очень существенно — в тысячи раз — меняют его электрическое сопротивление. Подробнее об этом будет рассказано в дальнейшем.

Одним из экспериментальных подтверждений наличия точечных дефектов в кристаллах является диффузия. Около 100 лет назад, в 1896 г., английский металлург У. Робертс-Остен проделал такой опыт. Он крепко прижал тонкий золотой диск к отшлифованному торцу цилиндра из чистого свинца и поместил эту пару на 10 дней в печь при температуре 200 °С. Когда отжиг кончился, оказалось, что металлы разъединить уже невозможно. Тогда экспериментатор разрезал составной цилиндр вдоль оси и, рассмотрев срез под микроскопом, убедился, что золото и свинец проникли друг в друга; произошло перемешивание металлов, т. е. диффузия.

Но почему атомы одного металла проникают внутрь другого? Мы уже говорили, что тепловое движение атомов в твёрдых телах представляет собой малые колебания около положения равновесия — узла кристаллической решётки. Амплитуда этих колебаний много меньше расстояния между узлами. У атома, совершающего такие колебания, нет шансов попасть в соседний узел.

В свете всего сказанного взаимное перемешивание атомов золота и свинца — удивительный факт. Как они это делают? Каков механизм перемешивания атомов?

Ответ на этот вопрос дал один из основоположников физики твёрдого тела, Я. И. Френкель. Основываясь на представлении о точечных дефектах в кристаллах, Френкель предложил два основных механизма диффузии в твёрдых телах: вакансионный (рис. 8.20, *а*: атом перемещается, обмениваясь местами с вакансией) и междоузельный

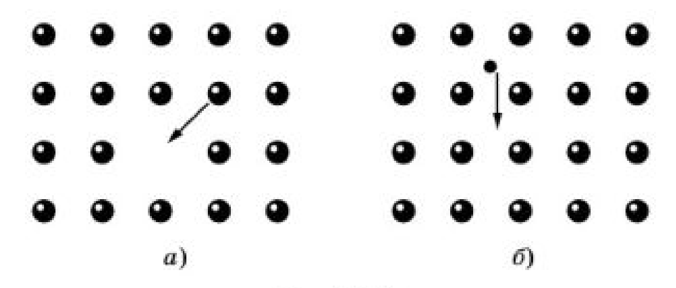


Рис. 8.20

(рис. 8.20, *б*: атом перемещается по междоузлиям). Вторым способом перемещаются маленькие (по размеру) атомы примесей, а первым — все остальные: это самый распространённый механизм диффузии.

Дислокации

Гораздо большее влияние на свойства кристаллов оказывают **линейные** дефекты, при которых нарушения структуры сосредоточены вблизи протяжённых линий. Такие дефекты называют **дислокациями** (от лат. dislocatio — смещение).

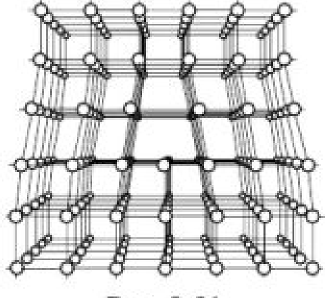


Рис. 8.21

Различают две основные дислокации — краевую и винтовую*.

Краевая дислокация схематически показана на рисунке 8.21. Атомные плоскости (атомные слои) часто (например, в процессе роста кристалла) обрываются внутри кристалла. В результате образуется «лишняя» полуплоскость. Искажение, как видно из рисунка, сосредоточено в основном вблизи нижнего края полуплоскости «лишних» атомов. Под дислокацией здесь понимают линию, проходящую вдоль края «лишней» атомной полуплоскости.

На расстоянии нескольких атомных диаметров от дислокационной линии искажения настолько малы, что в этих местах кристалл имеет почти совершенную форму. Искажения возле края «лишней» полуплоскости вызваны тем, что ближайшие атомы как бы «пытаются» согласовать своё расположение с резким обрывом «лишней» полуплоскости.

Любая царапинка на поверхности кристалла может стать причиной краевой дислокации. Действительно, царапинку на поверхности кристалла можно рассматривать как нехватку атомной плоскости. В результате теплового движения атомы из соседних областей могут перейти на поверхность, а дислокация тем самым переместится вовнутрь.

Винтовая дислокация

Более сложной является винтовая дислокация. Представим себе рассечённую наполовину кристаллическую решётку, в которой две примыкающие части (блоки) сдвинуты так,

---

* В реальных условиях дислокация обычно представляет собой сочетание этих двух видов.

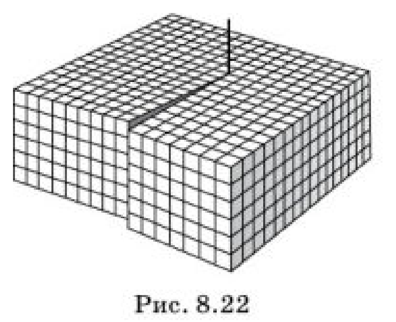


Рис. 8.22

что одна часть смещена относительно другой на толщину одного слоя — периода решётки (рис. 8.22). Наибольшие искажения сосредоточены на оси. Область, примыкающая к этой оси, и называется спиральной или винтовой дислокацией.

Почему данная дислокация получила такое название? Кристалл с дислокацией состоит не из параллельных атомных плоскостей, а скорее представляет собой одну плоскость, закрученную в виде винтовой лестницы. Крошечный наблюдатель, совершающий прогулку вокруг оси (см. рис. 8.22), начиная сверху, будет после каждого круга опускаться на один «этаж» ниже по покатой спирали. В данном случае дислокация является правовинтовой, потому что путь по спирали вниз всё время поворачивает направо. Существуют и левосторонние дислокации.

Количество дислокаций характеризуется числом дислокационных линий, пересекающих в кристалле элемент поверхности площадью в 1 см^2. Это число меняется в широких пределах: от 10^2—10^3 см$^{-2}$ до 10^{11}—10^{12} см$^{-2}$.

Выращивание кристаллов без дефектов — очень сложная задача, и она решена только для немногих веществ. Знание условий образования дефектов в кристаллах и способов их устранения имеет большое значение при использовании кристаллических тел (см. § 8.6). Винтовые дислокации играют решающую роль в росте кристаллов.

Рост кристаллов

Природа строит кристалл подобно тому, как каменщик складывает стенку из кирпичей. Из беспорядочной совокупности атомов или молекул жидкости (или газа) выбирается один за другим подходящий «кирпич» и пристраивается упорядоченным образом к строящейся стенке — кристаллу.

Вероятность присоединения атома к кристаллу тем больше, чем с большим количеством атомов он окажется связанным на поверхности кристалла. Если атом оседает на плоскую поверхность, то он будет связан только с одним-двумя атомами этой поверхности. Энергия такой связи мала, и, следовательно, мала вероятность присоединения атома к кристаллу. Тепловое движение препятствует этому.

Иное дело, если на поверхности кристалла имеется ступенька, образованная винтовой дислокацией. Здесь присоединяемый атом окажется связанным с несколькими другими, и вероятность присоединения атома к кристаллу будет много больше. Именно благодаря винтовой дислокации при росте кристалла образуются всё новые и новые слои путём присоединения атомов к уже имеющейся ступеньке. Дислокация чрезвычайно ускоряет рост кристаллов.

Дислокационная ступенька в результате присоединения новых атомов расширяется на поверхности кристалла. Однако при этом она загибается. Чтобы понять причину этого, рассмотрим цепочку конькобежцев, вращающуюся вокруг одного из концов цепочки. Для сохранения прямой линии конькобежцы на внешнем конце цепочки должны бежать быстрее тех, которые находятся ближе к неподвижному центру вращения. Ведь они обегают окружность большего радиуса.

В случае ступеньки кристалла её внешний край не застраивается быстрее внутреннего, так как атомы присоединяются к ней в беспорядке с более или менее постоянной скоростью вдоль всей длины ступеньки. В таком случае по мере застройки продвижение внешней части ступеньки вокруг закреплённой оси (линии дислокации) происходит недостаточно быстро и ступенька изгибается, образуя спираль. Постепенное наращивание ступеньки новыми и новыми слоями атомов приводит к тому, что на грани кристалла образуется спиральная башенка. Центральная её часть как бы ввинчивается в пространство, опережая в своём движении нижние ступеньки лестницы, которые со временем превращаются в завершённые атомные слои. На рисунке 8.23, *а—г* показаны последовательные стадии роста кристалла.

Фотографии, полученные с помощью электронного микроскопа, подтверждают реальность спирального роста кристаллов. На рисунке 8.24 представлена микрофотография спиральных ступенек на поверхности кристалла карбида кремния.

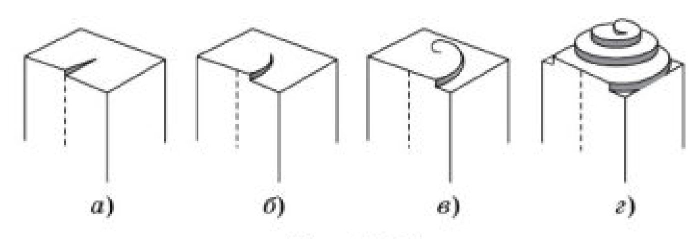


Рис. 8.23

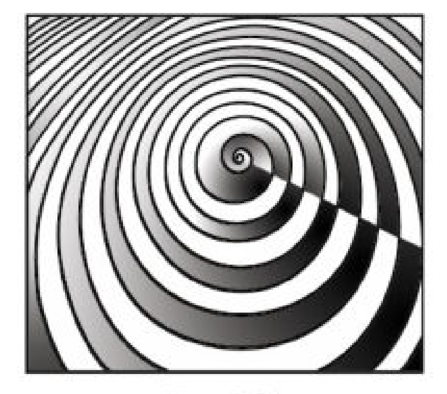


Рис. 8.24

Зарождение кристалла облегчается при наличии в растворе или расплаве мельчайших инородных тел — пылинок и других частиц. В данном случае зародыши кристаллов образуются не путём объединения при случайных столкновениях атомов или молекул, а в результате осаждения атомов на твёрдых инородных телах, практически всегда присутствующих в расплаве, растворе или газе. Например, «зародышами» снежинок являются взвешенные в воздухе твёрдые пылинки, чаще всего мельчайшие кварцевые песчинки. Неправильная форма пылинки, на которой начинается зарождение кристалла, способствует возникновению в нём дислокации и резкому увеличению скорости роста кристалла.

Дефекты в кристаллах бывают точечными или линейными. Особо важное значение имеют линейные дефекты — дислокации. Винтовые дислокации определяют скорость роста кристаллов.

? 1. Как называются нарушения в расположении частиц кристаллических тел? Чем они вызываются? Перечислите виды подобных нарушений и дайте их характеристику.
2. Опишите, как происходит рост кристаллов. Каким образом рост кристаллов зависит от вида их дефекта?

§ 8.6. ОБЪЯСНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЁРДЫХ ТЕЛ НА ОСНОВАНИИ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Механические свойства твёрдых тел и виды их деформаций (упругих и пластических) были достаточно подробно рассмотрены в «Механике», в § 2.4 было дано ка-

чественное объяснение справедливости закона Гука при малых деформациях. В дальнейшем после знакомства с законами электрических взаимодействий мы рассмотрим простейшую количественную теорию упругих деформаций ионных кристаллов. Теперь же познакомимся с объяснением пластических деформаций.

Механизм пластических деформаций

При упругих деформациях в кристаллических телах атомы лишь незначительно смещаются относительно друг друга. При пластических деформациях смещения атомов или молекул могут во много раз превышать расстояния между ними. Однако нарушения всей кристаллической структуры тела не происходит. Отдельные слои кристаллической решётки проскальзывают относительно друг друга. На рисунке 8.25 изображён тонкий кристалл меди после растяжения. Хорошо видны скольжения слоёв.

Важно, что у всех кристаллов скольжение атомных слоёв происходит не сразу по всему объёму кристалла, а осуществляется за счёт передвижения дислокаций. Перемещение же дислокаций связано с перестройкой решётки, затрагивающей одновременно небольшую группу атомов вдоль одной линии. Из-за этого прочность кристалла оказывается в десятки раз меньше той, которая была бы в совершенном кристалле без дислокаций. В таком кристалле один атомный слой должен был бы смещаться относительно другого сразу по всему кристаллу.

Процесс перемещения дислокаций подобен перемещению складки по ковру (рис. 8.26). Складку перемещать легче, чем весь ковёр, а в результате ковёр в целом сдвигается на некоторое расстояние, и складка исчезает. Точно так же дислокация исчезает после того, как движущаяся линия дислокации достигает поверхности кристалла.

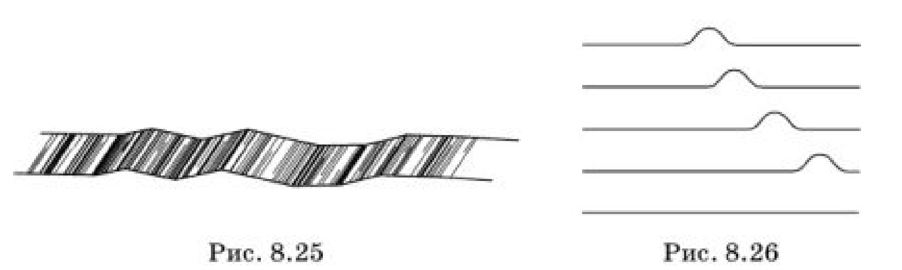


Рис. 8.25 Рис. 8.26

Дислокации и прочность твёрдых тел

Пластические деформации, как мы выяснили, связаны с наличием дислокаций в кристаллах и возможностью их перемещений. Эти перемещения тормозятся различными препятствиями: атомами примесей, твёрдыми микроскопическими включениями, границами кристаллических зёрен в поликристаллах, пересечениями с другими дислокациями. Если бы подобных торможений не было, то деформирующие силы быстро переместили бы все дислокации на поверхность кристалла, после чего кристалл стал бы исключительно прочным. На самом деле торможение дислокаций приводит к увеличению их числа в кристалле, к размножению дислокаций.

Наиболее прочными должны быть кристаллы, совершенно лишённые дислокаций. Но в реальных кристаллах они всегда имеются. Если число дислокаций невелико, то они практически перемещаются без пересечений, и прочность кристалла не очень велика. Упрочнение кристалла может быть достигнуто включением в него примесей или уменьшением размеров зёрен в поликристаллах, а также увеличением числа дислокаций.

В технике широко используют повышение прочности металлов путём введения в них специальных добавок: никеля, вольфрама, ванадия и др.

Пластические деформации сами могут привести к увеличению количества дислокаций за счёт их размножения при пересечениях. Этот способ повышения прочности называют наклёпом. Наклёп осуществляют, протягивая металлические заготовки между валками или другими способами. Однако чрезмерное увеличение числа дислокаций делает кристаллическую решётку неустойчивой, и материал теряет прочность. В настоящее время знания о кристаллах и их дефектах достигли такого уровня, что можно точно предсказать, какова может быть прочность различных материалов. Разработаны принципы проектирования материалов с заданными свойствами. А это чрезвычайно важно для создания сверхзвуковых самолётов, космических ракет, дешёвых и прочных автомобилей, тракторов и т. д. Появилась возможность повышения прочности материалов и тем самым уменьшения веса машин и механизмов, увеличения их надёжности.

Пластические деформации вызываются перемещением дислокаций. Материал без дислокаций был бы исключительно прочен.

? **1.** Опишите механизм пластических деформаций.

2. Объясните, как дислокации влияют на прочность твёрдых тел.

§ 8.7. ПЛАВЛЕНИЕ И ОТВЕРДЕВАНИЕ

Много внимания было уделено взаимным превращениям жидкостей и газов. Теперь рассмотрим превращение твёрдых тел в жидкости и жидкостей в твёрдые тела.

Плавление кристаллических тел

Плавлением называется превращение вещества из твёрдого состояния в жидкое.

Между плавлением кристаллических и аморфных тел есть существенное различие. Чтобы кристаллическое тело начало плавиться, его необходимо нагреть до вполне определённой для каждого вещества температуры, называемой температурой плавления.

Например, при нормальном атмосферном давлении температура плавления льда равна 0 °C, нафталина — 80 °C, меди — 1083 °C, вольфрама — 3380 °C.

Чтобы тело расплавилось, недостаточно его нагреть до температуры плавления; необходимо продолжать подводить к нему теплоту, т. е. увеличивать его внутреннюю энергию. *Во время плавления температура кристаллического тела не меняется.*

Если тело продолжать нагревать и после того, как оно расплавилось, температура его расплава будет расти. Сказанное можно проиллюстрировать графиком зависимости температуры тела от времени его нагревания (рис. 8.27). Участок AB соответствует нагреванию твёрдого тела, горизонтальный участок BC — процессу плавления и участок CD — нагреванию расплава. Кривизна и наклон участков графика AB и CD зависят от условий процесса (массы нагреваемого тела, мощности нагревателя и т. п.).

Переход кристаллического тела из твёрдого состояния в жидкое происходит резко, скачком — либо жидкость, либо твёрдое тело.

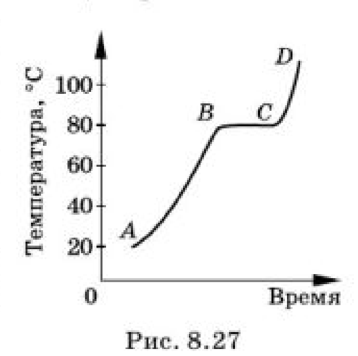


Рис. 8.27

Плавление аморфных тел

Совсем не так ведут себя аморфные тела. При нагревании они постепенно, по мере повышения температуры, размягчаются и в конце концов становятся жидкими, оставаясь в течение всего времени нагревания однородными. Никакой определённой температуры перехода из твёрдого состояния в жидкое нет. На рисунке 8.28 изображён график зависимости температуры от времени при переходе аморфного тела из твёрдого состояния в жидкое.

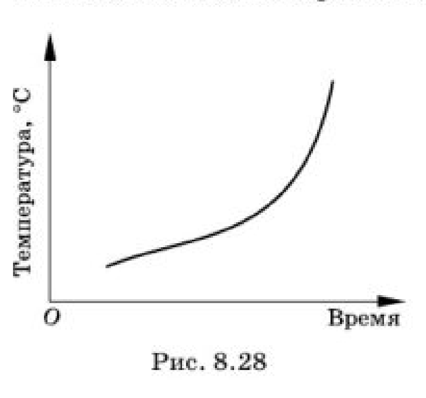


Рис. 8.28

Отвердевание кристаллических и аморфных тел



Переход вещества из жидкого состояния в твёрдое называется отвердеванием или кристаллизацией (для кристаллических тел).

Между отвердеванием кристаллических и аморфных тел тоже имеется существенное различие. При охлаждении расплавленного кристаллического тела (расплава) оно продолжает оставаться в жидком состоянии, пока температура его не снизится до определённого значения. При этой температуре, называемой температурой кристаллизации, тело начинает кристаллизоваться. Температура кристаллического тела во время отвердевания не изменяется. Многочисленные наблюдения показали, что *кристаллические тела плавятся и отвердевают при одной и той же определённой для каждого вещества температуре.* При дальнейшем охлаждении тела, когда весь расплав отвердеет, температура тела снова будет уменьшаться. Сказанное иллюстрируется графиком зависимости температуры тела от времени его охлаждения (рис. 8.29). Участок A_1B_1 соответствует охлаждению жидкости, горизонтальный участок B_1C_1 — процессу кристаллизации и участок C_1D_1 — охлаждению твёрдого тела, получившегося в результате кристаллизации.

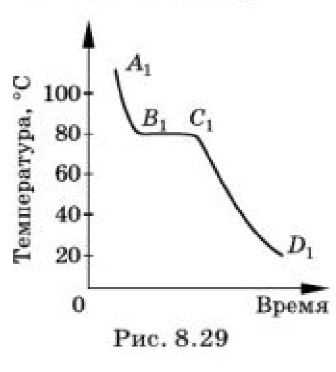


Рис. 8.29

Вещества из жидкого состояния в твёрдое при кристаллизации переходят тоже резко без промежуточных состояний.

Затвердевание аморфного тела, например смолы, происходит постепенно и одинаково во всех своих частях; смола при этом остаётся однородной, т. е. затвердевание аморфных тел — это только постепенное загустевание их. Определённой температуры отвердевания нет. На рисунке 8.30 изображён график зависимости температуры застывающей смолы от времени.

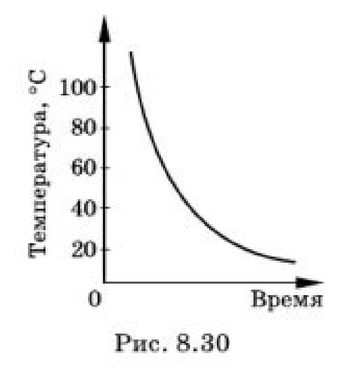


Рис. 8.30

Таким образом, *аморфные вещества не имеют определённой температуры плавления и отвердевания.*

Объяснение плавления и отвердевания на основании молекулярно-кинетической теории

Чтобы расплавить тело, мы его нагреваем. По мере нагревания кристаллического тела средняя энергия его молекул увеличивается за счёт возрастания средней кинетической энергии. Увеличивается также потенциальная энергия молекул, так как увеличивается амплитуда колебаний молекул около положений равновесия, и увеличивается расстояние между молекулами, т. е. тела при нагревании расширяются.

После того как достигнута температура плавления, вся подводимая энергия идёт на совершение работы по разрушению пространственной (кристаллической) решётки, т. е. на увеличение потенциальной энергии молекул. В процессе плавления кинетическая энергия молекул не изменяется, о чём свидетельствует постоянство температуры во время плавления.

Во время затвердевания вещества его молекулы располагаются упорядоченно, образуя кристаллическую решётку. Их потенциальная энергия в процессе кристаллизации уменьшается, а кинетическая энергия остаётся неизменной. Поэтому при кристаллизации температура не изменяется и происходит отдача количества теплоты окружающим телам.

Когда при охлаждении отвердевает аморфное вещество, его частицы не располагаются в правильном порядке и не образуют кристаллические решётки. В твёрдом состоянии ча-

стицы аморфного тела расположены примерно в таком же беспорядке, как и в жидком. При отвердевании аморфных веществ происходит постепенное уменьшение кинетической энергии их частиц. Но нет скачкообразного уменьшения их потенциальной энергии. Точно так же при нагревании твёрдого аморфного тела постепенно растёт кинетическая энергия его частиц, но нет скачкообразного возрастания их потенциальной энергии, как это наблюдается при плавлении кристаллических тел.

Кратко различие в поведении кристаллических и аморфных тел при плавлении можно объяснить следующим образом. В кристаллах связи между молекулами в разных местах разрушаются одновременно, так как они всюду одинаковы. Поэтому переход в жидкое состояние происходит при строго определённой температуре. В аморфных телах при некоторой температуре часть молекул приобретает способность к более или менее свободному перемещению, другая же ещё нет. Ведь связи между молекулами неодинаковы из-за отсутствия строгого порядка в расположении молекул относительно друг друга. В результате переход из твёрдого состояния в жидкое оказывается растянутым на некоторый интервал температур.

В дальнейшем мы будем говорить только о плавлении и отвердевании (кристаллизации) кристаллических тел.

Переохлаждение жидкости

Жидкость может быть охлаждена ниже температуры кристаллизации. Это явление называется переохлаждением. Его можно наблюдать, например, при охлаждении расплавленного гипосульфита. Гипосульфит расплавляется в пробирке (его температура плавления 48 °C) и остаётся в ней в жидком состоянии при охлаждении даже до комнатной температуры. Однако если бросить в пробирку кристаллик гипосульфита или встряхнуть её, то начнётся быстрая кристаллизация.

В § 8.3 мы отмечали, что для начала кристаллизации необходимы так называемые центры кристаллизации. Если же центров кристаллизации нет, то может произойти переохлаждение жидкости на несколько градусов или даже десятков градусов. Переохлаждение чистой, без каких-либо пылинок и примесей воды нередко наблюдается в природе. Капельки тумана могут оставаться незамёрзшими даже при сильных морозах. Такие капельки, осаждаясь на почве, об-

разуют гололедицу. Также переохлаждёнными оказываются обычно капельки воды в облаках.

Переохлаждённая жидкость находится в неустойчивом состоянии; с течением времени под влиянием тех или иных воздействий переохлаждённая жидкость переходит в более устойчивое при данной температуре кристаллическое состояние.

Плавление и кристаллизация тел происходят при строго фиксированной температуре для заданного давления. Аморфные тела постепенно переходят из одного состояния в другое и не имеют определённой температуры плавления (отвердевания).

?
1. Одинакова ли температура плавления для всех твёрдых тел? Почему?
2. Как изменяется температура вещества в процессе перехода из твёрдого состояния в жидкое?
3. Изобразите график зависимости температуры тел от времени нагревания в процессе перехода из твёрдого состояния в жидкое.
4. Процессы перехода вещества из твёрдого состояния в жидкое и наоборот происходят при одинаковой температуре. Почему?
5. Объясните процессы плавления и отвердевания на основании молекулярно-кинетической теории.

§ 8.8. ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕНИЯ

При плавлении происходит разрушение пространственной решётки кристаллического тела. На этот процесс расходуется определённое количество энергии от какого-нибудь внешнего источника. В результате внутренняя энергия тела в процессе плавления увеличивается.

Количество теплоты, необходимое для перехода тела из твёрдого состояния в жидкое при температуре плавления, называется теплотой плавления.

В процессе отвердевания тела, наоборот, внутренняя энергия тела уменьшается. Тело отдаёт теплоту окружающим телам. Согласно закону сохранения энергии количество теплоты, поглощённое телом при плавлении (при температуре плавления), равно количеству теплоты, отданному этим телом при отвердевании (при температуре отвердевания).

Удельная теплота плавления

Теплота плавления зависит от массы плавящегося вещества и его свойств. Зависимость теплоты плавления от рода вещества характеризуют удельной теплотой плавления этого вещества.

Удельной теплотой плавления вещества называется отношение теплоты плавления тела из этого вещества к массе тела.

Обозначим теплоту плавления через $Q_{пл}$, массу тела буквой m и удельную теплоту плавления буквой λ. Тогда

$$\lambda = \frac{Q_{пл}}{m}. \quad (8.8.1)$$

Таким образом, чтобы расплавить кристаллическое тело массой m, взятое при температуре плавления, необходимо количество теплоты, равное

$$Q_{пл} = \lambda m. \quad (8.8.2)$$

Теплота кристаллизации

Согласно закону сохранения энергии количество теплоты, выделяемое при кристаллизации тела (при температуре кристаллизации), равно

$$Q_{кр} = -\lambda m. \quad (8.8.3)$$

Из формулы (8.8.1) следует, что удельная теплота плавления в СИ выражается в джоулях на килограмм.

Довольно велика удельная теплота плавления льда 333,7 кДж/кг. Удельная теплота плавления свинца всего лишь 23 кДж/кг, а золота — 65,7 кДж/кг.

Формулы (8.8.2) и (8.8.3) используются при решении задач на составление уравнений теплового баланса в тех случаях, когда мы имеем дело с плавлением и отвердеванием кристаллических тел.

Роль теплоты плавления льда и кристаллизации воды в природе

Поглощение теплоты при таянии льда и выделение её при замерзании воды оказывают значительное влияние на изменение температуры воздуха, особенно вблизи водоёмов. Все вы, вероятно, замечали, что во время обильных снегопадов обычно наступает потепление.

Очень важно большое значение удельной теплоты плавления льда. Ещё в конце XVIII в. шотландский учёный Д. Блэк

(1728—1799), открывший существование теплоты плавления и кристаллизации, писал: «Если бы лёд не обладал значительной теплотой плавления, то тогда весной вся масса льда должна была бы растаять в несколько минут или секунд, так как теплота из воздуха непрерывно передаётся льду. Но тогда последствия этого были бы ужасны: ведь и при существующем положении возникают большие наводнения и сильные потоки воды при таянии больших масс льда и снега».

Сопло космической ракеты

Приведём интересный технический пример практического использования теплоты плавления и парообразования. При изготовлении сопла для космической ракеты следует учитывать, что струя газов, выходящая из сопла ракеты, имеет температуру около 4000 °С. В природе практически отсутствуют материалы, которые в чистом виде могли бы выдержать такую температуру. Поэтому приходится прибегать ко всякого рода ухищрениям, чтобы охладить материал сопла во время горения топлива.

Сопло изготавливают методом порошковой металлургии. В полость формы закладывается порошок тугоплавкого металла (вольфрам). Затем его подвергают сдавливанию. Порошок спекается, получается пористая структура типа пемзы. Затем эта «пемза» пропитывается медью (её температура плавления всего 1083 °С).

Полученный материал называется псевдосплавом. На рисунке 8.31 показана фотография микроструктуры псевдо-

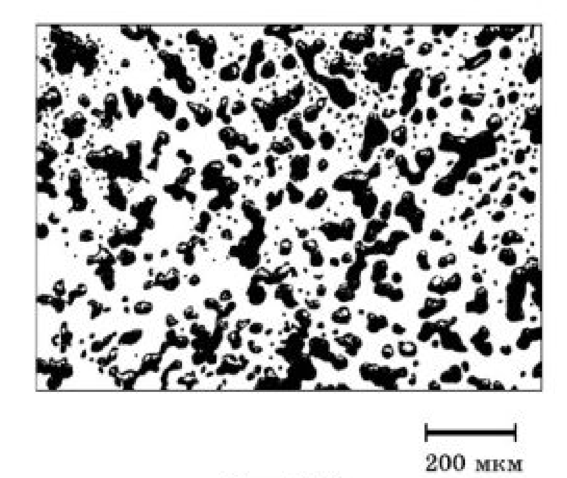


Рис. 8.31

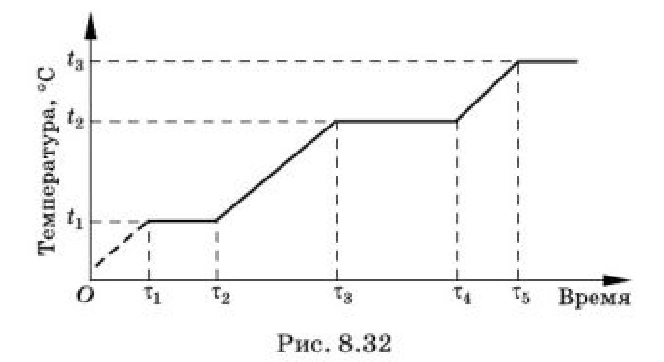


Рис. 8.32

сплава. На белом фоне вольфрамового каркаса видны медные включения неправильной формы. Этот сплав может, как это ни невероятно, кратковременно работать даже при температуре газов, образующихся при сгорании топлива, т. е. выше 4000 °C.

Происходит это следующим образом. Вначале температура сплава растёт, пока не достигнет температуры плавления меди t_1 (рис. 8.32). После этого температура сопла не будет меняться, пока вся медь не расплавится (промежуток времени от τ_1 до τ_2). В дальнейшем температура опять возрастает до тех пор, пока медь не закипит. Это происходит при температуре t_2 = 2595 °C, меньшей температуры плавления вольфрама (3380 °C). Пока вся медь не выкипит, температура сопла опять меняться не будет, так как испаряющаяся медь забирает теплоту от вольфрама (промежуток времени от τ_3 до τ_4). Конечно, сколько угодно долго сопло работать не будет. После испарения меди вольфрам опять начнёт нагреваться. Однако двигатель ракеты работает всего лишь несколько минут, а за это время сопло не успеет перегреться и расплавиться.

Фазовые переходы. Сублимация

Мы познакомились со взаимными превращениями жидкостей и газов, твёрдых тел и жидкостей.

Возможен также непосредственный переход твёрдых тел в газообразное состояние. Такой процесс называется с у б л и м а ц и е й* (или возгонкой). Именно благодаря этому процессу высыхает замёрзшее бельё на большом морозе. Без плавления переходит в газообразную фазу «сухой лёд» —

---

* От латинского слова sublimo — «возношу».

твёрдая углекислота. Сублимация специальных веществ используется для теплозащиты космических аппаратов, спускающихся с околоземной орбиты на Землю. Дело в том, что процесс сублимации, как и плавления, сопровождается поглощением теплоты.

Все рассмотренные процессы (плавление, парообразование, кристаллизация, конденсация и сублимация) сопровождаются поглощением или выделением некоторого количества теплоты.

Переход вещества из одного состояния в другое, сопровождающийся скачкообразным изменением физических свойств вещества (плотности, концентрации компонентов и др.) при непрерывном изменении внешних параметров (температуры, давления и т. д.), **называется фазовым переходом первого рода.**

Таким образом, парообразование, конденсация, сублимация, плавление и кристаллизация представляют собой фазовые переходы первого рода.

Существуют фазовые переходы второго рода. При этих переходах не происходит скачкообразного изменения плотности вещества, и они не сопровождаются выделением или поглощением теплоты. Переход жидкого гелия в сверхтекучее состояние является примером фазового перехода второго рода.

Количество теплоты, необходимое для плавления кристаллического вещества единичной массы, называется удельной теплотой плавления. При кристаллизации такое же количество теплоты выделяется.

? 1. Дайте определение понятия «удельная теплота плавления».
2. Как рассчитать энергию, выделяемую веществом при его кристаллизации?
3. Сравните энергии: выделяемую веществом при его кристаллизации и поглощаемую при плавлении.
4.° Твёрдое тело может образоваться как путём кристаллизации жидкости, так и конденсацией пара в кристалл, минуя жидкую фазу (процесс, обратный сублимации). В каком случае выделяется бо́льшая энергия?
5. Чем отличаются фазовые переходы первого и второго рода?
6. Как зависит температура окружающей среды от процессов плавления льда и кристаллизации воды? Аргументируйте свой ответ примерами конкретных городов, регионов, материков.

§ 8.9. ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЁМА ТЕЛА ПРИ ПЛАВЛЕНИИ И ОТВЕРДЕВАНИИ. ТРОЙНАЯ ТОЧКА

Объём вещества при плавлении, как правило, увеличивается, а плотность уменьшается. При отвердевании, наоборот, объём уменьшается, а плотность увеличивается. Исключение составляют лёд, чугун, висмут и немногие другие вещества.

Объяснение «странного» поведения льда и воды

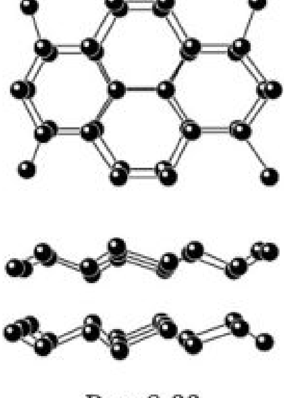


Рис. 8.33

Особенности в поведении льда при плавлении связаны с формой его кристаллической решётки. На рисунке 8.33 показана пространственная решётка кристаллов льда (наверху — вид сверху, внизу — вид сбоку). Шарики изображают атомы кислорода, положения атомов водорода не показаны. Из рисунка видно, что в кристалле льда молекулы расположены очень неравномерно. В одних местах (в пределах одного слоя) молекулы сближены, а в других местах (между слоями) имеются большие пустоты. При переходе от кристаллического состояния к жидкому расположение молекул меняется и делается более равномерным. Поэтому объём воды становится меньше объёма льда. При этом расстояние между молекулами, которые в кристалле расположены близко друг к другу (молекулы одного слоя), увеличивается, а расстояние между отдалёнными молекулами в разных слоях уменьшается. Потенциальная энергия первых увеличивается, а вторых — уменьшается, но увеличение потенциальной энергии близких молекул больше уменьшения потенциальной энергии отдалённых молекул. В результате получается, что внутренняя энергия воды оказывается больше внутренней энергии льда, из которого она образовалась, несмотря на уменьшение объёма. Поэтому плавление льда требует затраты теплоты, как и плавление других тел.

Вода и лёд в природе

Увеличение объёма воды при её замерзании имеет огромное значение в природе. Вследствие меньшей плотности льда по сравнению с плотностью воды (при 0 °С плотность льда

900 кг/м³, а воды — 1000 кг/м³) лёд плавает на воде. Обладая плохой теплопроводностью, слой льда защищает воду, находящуюся под ним, от охлаждения и вымерзания. Поэтому рыбы и другие живые существа, находящиеся в воде, не гибнут во время морозов. Если бы лёд тонул, то не очень глубокие водоёмы промерзали бы за зиму насквозь.

При расширении замерзающей воды в закрытом сосуде возникают огромные силы, способные разорвать толстостенный чугунный шар. Подобный опыт легко осуществить с бутылкой, наполненной водой по горлышко и выставленной на мороз. На поверхности воды образуется ледяная пробка, закупоривающая бутылку, и при расширении замерзающей воды бутылка будет разорвана.

Замерзание воды в трещинах горных пород приводит к их разрушению.

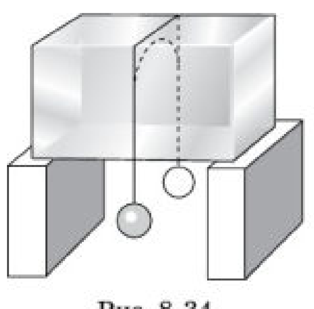
Способность воды расширяться при отвердевании должна учитываться при прокладке труб водопровода и канализации, а также водяного отопления. Во избежание разрыва при замерзании воды подземные трубы должны укладываться на такой глубине, чтобы температура не опускалась ниже 0 °С. Наружные части труб должны на зимнее время покрываться теплоизолирующими материалами.

Зависимость температуры плавления от давления

Если плавление вещества сопровождается увеличением его объёма, то при увеличении внешнего давления температура плавления вещества повышается. Это можно объяснить следующим образом. Сжатие вещества (при увеличении внешнего давления) препятствует увеличению расстояния между молекулами и, следовательно, возрастанию потенциальной энергии взаимодействия молекул, которое требуется для перехода в жидкое состояние. Поэтому приходится нагревать тело до большей температуры, пока потенциальная энергия молекул не достигнет необходимого значения.

Если плавление вещества сопровождается уменьшением его объёма, то при увеличении внешнего давления температура плавления вещества понижается.

Так, например, лёд при давлении $6 \cdot 10^7$ Па плавится при температуре –5 °С, а при давлении $2{,}2 \cdot 10^8$ Па температура плавления льда равна –22 °С.


Рис. 8.34

Понижение точки плавления льда при увеличении давления хорошо иллюстрируется опытом (рис. 8.34). Нейлоновая нить проходит сквозь лёд, не разрушая его. Дело в том, что благодаря значительному давлению нити на лёд он подтаивает под ней. Вода, вытекая из-под нити, тут же вновь замерзает.

Тройная точка

Жидкость может находиться в равновесии со своим паром (насыщенным паром). На рисунке 6.5 (см. § 6.3) представлена зависимость давления насыщенного пара от температуры (кривая AB), полученная экспериментально. Так как кипение жидкости происходит при давлении, равном давлению её насыщенных паров, то эта же кривая даёт зависимость температуры кипения от давления. Область, лежащая ниже кривой AB, отвечает газовому состоянию, а выше — жидкому.

Кристаллические тела плавятся при определённой температуре, при которой твёрдая фаза находится в равновесии с жидкой. Температура плавления зависит от давления. Эту зависимость можно показать на том же рисунке, где изображена зависимость температуры кипения от давления.

На рисунке 8.35 кривая TK характеризует зависимость температуры кипения от давления. Она заканчивается в точке K, соответствующей критической температуре, так как выше этой температуры жидкость не может существовать. Левее кривой TK по экспериментальным точкам построена кривая TC зависимости температуры плавления от давления (левее, так как твёрдой фазе соответствуют меньшие температуры, чем жидкой). Обе кривые пересекаются в точке T.

Что будет с веществом при температуре ниже температуры $t_{\text{тр}}$, соответствующей точке T? Жидкая фаза при этой температуре уже существовать не может. Вещество будет либо в твёрдом, либо в газообразном состоянии. Кривая OT (см. рис. 8.35) соответствует равновесным состояниям твёрдое тело — газ, возникающим при сублимации твёрдых тел.

Три кривые KT, TC и OT делят фазовую плоскость на три области, в которых вещество может находиться в одной из трёх фаз. Сами кривые описывают равновесные состояния

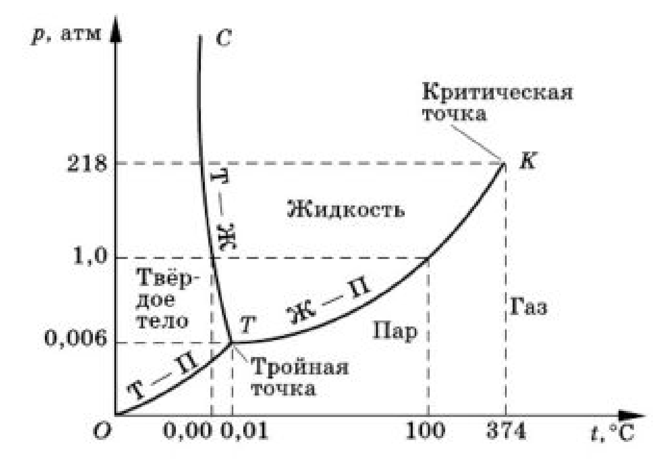


Рис. 8.35

жидкость — пар, жидкость — твёрдое тело и твёрдое тело — пар. Существует только одна точка T, в которой все три фазы находятся в равновесии. Это и есть тройная точка.

Тройной точке отвечают единственные значения температуры и давления. Её можно точно воспроизводить, и она служит одной из важнейших опорных точек при построении абсолютной шкалы температур. Для воды абсолютная температура тройной точки принята равной $T_{тр} = 273{,}16$ К, или $t_{тр} = 0{,}01$ °C.

На рисунке 8.35 изображена фазовая диаграмма воды, у которой температура плавления уменьшается с ростом давления. Для обычных веществ кривая TC наклонена в противоположную сторону по отношению к вертикали, проходящей через точку T.

Например, такой вид будет иметь фазовая диаграмма оксида углерода CO_2. Температура тройной точки CO_2 $t_{тр} = -56{,}6$ °C, а давление $p_{тр} = 5{,}1$ атм. Поэтому при обычном атмосферном давлении и температуре, близкой к комнатной, углекислота не может находиться в жидком состоянии. Твёрдая фаза CO_2 называется обычно сухим льдом. Он имеет очень низкую температуру и не плавится, а сразу испаряется (сублимация).

Изменение объёма при плавлении и отвердевании непосредственно связано с зависимостью температуры плавления от давления. У подавляющего большинства веществ температура плавления растёт с давлением. У воды и некоторых других веществ она, напротив, по-

нижается. Для обитателей Земли на высоких географических широтах это великое благо.

Существует единственная точка на p—t-диаграмме (тройная точка), в которой все три фазы вещества находятся в равновесии.

* * *

В заключение отметим огромное значение физики твёрдого тела для развития техники и цивилизации вообще.

Человечество всегда использовало и будет использовать твёрдые тела. Но если раньше физика твёрдого тела не поспевала за развитием технологии, основанной на непосредственном опыте, то теперь положение изменилось. Теоретические исследования начинают приводить к созданию твёрдых тел, свойства которых совершенно необычны и получить которые методом «проб и ошибок» было бы невозможно. Изобретение транзисторов, о которых пойдёт речь в дальнейшем, яркий пример того, как понимание структуры твёрдых тел привело к революции во всей радиотехнике.

Создание материалов с заданными механическими, магнитными и другими свойствами — одно из основных направлений физики твёрдого тела. Приблизительно половина физиков всего мира работает сейчас в области физики твёрдого тела.

? **1.°** Сделайте предположение о том, какие изменения произошли бы в природе, если бы вода при замерзании не расширялась.

2. Каким образом температура плавления вещества зависит от внешнего давления?

3. Изобразите фазовую диаграмму воды. Охарактеризуйте основные точки на этой диаграмме.

4. Существуют ли условия, при которых вещество может находиться одновременно в трёх агрегатных состояниях?

§ 8.10. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении большинства задач на материал § 8.9 используется уравнение теплового баланса $\sum_i Q_i = 0$ с включаемой в него теплотой плавления $Q_{пл} = \lambda m$ или теплотой кристаллизации $Q_{кр} = -\lambda m$.

Решение ряда задач требует знания кристаллической структуры вещества.

Задача 1

Кристаллы поваренной соли состоят из чередующихся ионов натрия и хлора, причём ячейка кристалла имеет форму куба (рис. 8.36). Определите средние расстояния между центрами ионов в ячейке. Молярная масса поваренной соли 0,058 кг/моль, а её плотность 2200 кг/м³.

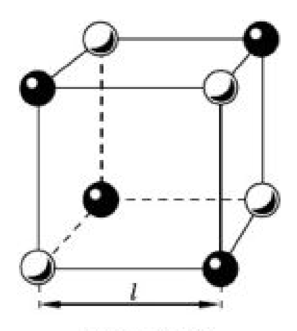


Рис. 8.36

Решение. Кубическая ячейка поваренной соли NaCl состоит из четырёх ионов Na и четырёх ионов Cl, находящихся в её вершинах. Каждый ион (Na или Cl) входит в состав восьми ячеек. Поэтому в кристалле NaCl число кубических ячеек равно суммарному числу ионов Na и Cl. Следовательно, в одном моле поваренной соли содержится $2N_А$ ячеек, где $N_А$ — постоянная Авогадро.

Обозначим искомое расстояние между ионами Na и Cl в ячейке буквой l, тогда объём ячейки будет равен l^3. Объём одного моля (молярный объём) поваренной соли равен

$$V_M = l^3 \cdot 2N_А. \qquad (8.10.1)$$

С другой стороны, молярный объём поваренной соли можно найти, разделив молярную массу на плотность:

$$V_M = \frac{M}{\rho}. \qquad (8.10.2)$$

Из выражений (8.10.1) и (8.10.2) получаем

$$l^3 \cdot 2N_А = \frac{M}{\rho}.$$

Отсюда

$$l = \sqrt[3]{\frac{M}{2\rho N_А}} \approx 2{,}8 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Задача 2

В массивный алюминиевый сосуд, нагретый до температуры $t_1 = 75$ °С, положили лёд массой $m_2 = 0{,}4$ кг при температуре $t_2 = 0$ °С. После установления теплового равновесия температура сосуда с его содержимым оказалась равной $t = 50$ °С. Какова масса m_1 сосуда? Удельные теплоёмкости алюминия и воды соответственно равны $c_1 = 770$ Дж/(кг · К)

и c_2 = 4200 Дж/(кг·К). Удельная теплота плавления льда $\lambda = 3{,}35 \cdot 10^5$ Дж/кг. Испарением воды и потерями тепла пренебречь.

Решение. Количество теплоты, отданное остывающим сосудом,

$$Q_1 = c_1 m_1 (t - t_1)$$

отрицательно, так как $t < t_1$.

На плавление льда пошло количество теплоты

$$Q_2 = \lambda m_2,$$

а на нагревание образовавшейся воды от 0 °C до температуры t — количество теплоты

$$Q_3 = c_2 m_2 (t - t_2).$$

Уравнение теплового баланса записывается в виде

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0,$$

или

$$c_1 m_1 (t - t_1) + \lambda m_2 + c_2 m_2 (t - t_2) = 0.$$

Откуда находим

$$m_1 = m_2 \frac{\lambda + c_2 (t - t_2)}{c_1 (t_1 - t)} = 113 \text{ кг}.$$

Задача 3

В калориметре находится вода массой m_1 = 400 г при температуре t_1 = 5 °C. К ней долили ещё 200 г (m_2) воды при температуре t_2 = 10 °C и положили лёд массой m_3 = 400 г при температуре t_3 = −60 °C. Какая температура t установится в калориметре? Удельные теплоёмкости льда и воды соответственно равны $c_л = 2{,}1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К) и $c_в = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К). Удельная теплота плавления льда $\lambda = 3{,}35 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Решение. В этой и подобных ей задачах не следует торопиться составлять уравнение теплового баланса. Надо сначала выяснить, расплавится ли весь лёд. Количество теплоты, которое выделяется водой при охлаждении до t_0 = 0 °C, равно

$$Q_1 = c_в m_1 (t_1 - t_0) + c_в m_2 (t_2 - t_0) = 16\,800 \text{ Дж}.$$

Для нагревания льда до 0 °C требуется

$$Q_2 = c_2 m_2 (t_0 - t_3) = 50\,400 \text{ Дж}.$$

Следовательно, лёд может нагреваться до температуры плавления только за счёт энергии, выделяющейся при замерзании воды. Для выделения недостающего количества теплоты $Q_3 = 33\,600$ Дж должна замёрзнуть вода массой

$$m_4 = \frac{Q_3}{\lambda} = 0{,}1 \text{ кг.}$$

В результате в калориметре образуется смесь из 500 г воды и 500 г льда, находящихся при температуре 0 °С.

Задача 4

С какой скоростью должна лететь свинцовая пуля, чтобы, ударившись о преграду, расплавиться, если до удара температура пули была $t = 127$ °С? При ударе на нагревание пули затрачивается $\eta = 80\%$ энергии пули (остальная энергия рассеивается в окружающее пространство). Удельная теплоёмкость свинца $c = 120$ Дж/(кг · К), температура плавления свинца $t_{\text{пл}} = 327$ °С. Удельная теплота плавления $\lambda = 2{,}5 \cdot 10^4$ Дж/кг.

Решение. Кинетическая энергия летящей пули $E_k = \frac{mv^2}{2}$, где m — масса пули, v — её скорость. На нагревание и плавление пули затрачивается энергия $Q = \eta E_k = \frac{\eta m v^2}{2}$.

С другой стороны, на нагревание и плавление пули должно быть затрачено количество теплоты, равное

$$Q = cm(t_{\text{пл}} - t) + \lambda m.$$

Следовательно, согласно закону сохранения энергии

$$\frac{\eta m v^2}{2} = cm(t_{\text{пл}} - t) + \lambda m.$$

Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{2[c(t_{\text{пл}} - t) + \lambda]}{\eta}} \approx 350 \text{ м/с.}$$

Упражнение 7

1. Если тело обладает анизотропией, означает ли это, что оно обязательно является кристаллическим?
2. Сколько атомов приходится на одну ячейку в кристаллах с объёмно-центрированной кубической структурой (см. рис. 8.11)?

3. Сколько элементарных ячеек содержится в 1 $см^3$ свинца? Кристаллическая решётка свинца гранецентрированная (см. рис. 8.9). Плотность свинца ρ = 11 300 кг/$м^3$. Молярная масса свинца M = 0,207 кг/моль. Постоянная Авогадро $N_А = 6{,}02 \cdot 10^{-23}$ $моль^{-1}$.

4. Равные количества соли растворяют в двух одинаковых сосудах с водой. В одном случае соль берут в виде одного большого кристалла, а в другом — в виде порошка. В каком случае температура раствора после полного растворения соли будет выше, если до растворения соль и вода находились в обоих случаях при одинаковой температуре?

5. Вода в стакане замерзает при 0 °С. Если же эту воду расчленить на маленькие капельки, то вода в них может быть переохлаждена до –40 °С. Так, например, капельки воды, из которых состоят облака, обычно начинают замерзать при температуре ниже –17 °С. Как объяснить этот факт?

6. Какая температура установится в латунном калориметре массой m_1 = 160 г, содержащем m_2 = 400 г воды при температуре t_1 = 25 °С, после того как расплавится помещённый в воду кусок льда массой m_3 = 50 г, взятый при температуре t_2 = 0 °С? Удельные теплоёмкости латуни и воды равны соответственно c_1 = 380 Дж/(кг · К) и c_2 = $= 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К). Удельная теплота плавления льда $\lambda = 3{,}34 \cdot 10^5$ Дж/кг.

7. В калориметре находится лёд. Определите теплоёмкость калориметра, если для нагревания его вместе с содержимым от 270 до 272 К требуется количество теплоты, равное Q_1 = 2100 Дж, а от 272 до 274 К — количество теплоты, равное Q_2 = 69 700 Дж. Удельные теплоёмкости льда и воды равны соответственно $c_1 = 2{,}1 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К) и $c_2 = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К). Удельная теплота плавления льда $\lambda = 3{,}34 \cdot 10^5$ Дж/кг.

8. В массивный алюминиевый сосуд, нагретый до температуры t_1 = 300 °С, положили лёд массой m_2 = 0,25 кг при температуре t_2 = 0 °С. Когда температура сосуда сравнялась с температурой его содержимого, оказалось, что в сосуде находится вода массой m_3 = 0,24 кг при t_3 = 100 °С. Какова масса сосуда? Удельная теплоёмкость алюминия c_1 = 800 Дж/(кг · К), удельная теплоёмкость воды $c_2 = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К). Удельная теплота плавления льда $\lambda = 3{,}34 \cdot 10^5$ Дж/кг, удельная теплота парообразования воды при 100 °С $r = 2{,}3 \cdot 10^6$ Дж/кг.

9. Осторожно охлаждая 0,5 кг воды, удалось довести её температуру до –8 °C. Какое количество льда образуется, если бросить в воду маленький кусочек льда? Удельная теплота плавления льда $\lambda = 3{,}34 \cdot 10^5$ Дж/кг. Считать удельную теплоёмкость переохлаждённой воды такой же, как и обычной воды, т. е. $c = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К).

10. В сосуде, из которого быстро выкачивают воздух, находится небольшое количество воды при 0 °C. За счёт интенсивного испарения происходит постепенное замораживание воды. Какая часть первоначального количества воды может быть обращена таким образом в лёд при 0 °C? Удельная теплота плавления льда при 0 °C равна $\lambda = 3{,}34 \cdot 10^5$ Дж/кг, удельная теплота парообразования воды при 0 °C $r = 2{,}5 \cdot 10^6$ Дж/кг.

11. В воду объёмом 1 л при 20 °C бросили комок мокрого снега массой 250 г. Когда весь снег растаял, то общая температура стала равной 5 °C. Определите количество воды в комке снега.

12. Сосуд со 100 г воды при температуре 0 °C был подвешен посредине комнаты. Через 15 мин температура воды в нём поднялась до 2 °C. Когда же в сосуде находилось равное по массе количество льда, то лёд растаял за 10 ч. Можно ли по этим данным оценить удельную теплоту плавления льда λ?

13. Лёд массой 100 г при температуре 0 °C помещён в теплонепроницаемую оболочку и подвергнут сжатию до давления p = 1200 атм. Найдите массу растаявшей части льда, если понижение температуры плавления происходит прямо пропорционально давлению и при увеличении давления на 138 атм температура плавления понижается на 1 °C.

14. В теплоизолированном сосуде содержится смесь воды массой m_1 = 500 г и льда массой m_2 = 54,4 г при температуре t_1 = 0 °C. В сосуд вводится насыщенный пар массой m_3 = = 6,6 г при температуре t_2 = 100 °C. Какой будет температура t после установления теплового равновесия? Удельная теплота парообразования воды $r = 2{,}3 \cdot 10^6$ Дж/кг, удельная теплота плавления льда $\lambda = 3{,}34 \cdot 10^5$ Дж/кг, удельная теплоёмкость воды $c = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К).

15. Два одинаковых кусочка льда летят навстречу друг другу с равными по модулю скоростями и при ударе обращаются в пар. Оцените минимально возможные скорости

льдинок перед ударом, если их температура равна –12 °C. Удельная теплоёмкость льда $c = 2{,}1 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К). Удельная теплота плавления льда при 0 °C $\lambda = 3{,}34 \cdot 10^5$ Дж/кг.

---

1. Напишите эссе «Аморфный человек».
2. Подготовьте краткое сообщение об одном из типов таких веществ или об их применении в технике.
3. Выявите общее и различное в следующих категориях: полиморфизм кристаллов, полиморфизм в биологии, полиморфизм компьютерных вирусов. Ответ представьте в виде таблицы.
4. Подготовьте энциклопедическую справку об одном из типов кристаллов.
5. Используя различные источники информации, обобщите существующие в настоящее время сведения о жидких кристаллах. Ответ представьте в виде схемы.
6. Подготовьте доклад «Дислокация: кристаллография, география, военное дело, медицина».
7. Подготовьте доклад «Перспективные направления и исследования структуры твёрдого тела (на материале отечественных и зарубежных источников)».

Глава 9

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЁРДЫХ И ЖИДКИХ ТЕЛ

В первых термометрах использовалось изменение объёма газа или жидкости при изменении температуры. Именно это свойство и позволило приписать любому телу определённую температуру, выражаемую числом. В этой главе мы рассмотрим, как меняются линейные размеры твёрдых тел, а также объёмы твёрдых тел и жидкостей в зависимости от температуры. О зависимости объёма газа от температуры было рассказано достаточно.

§ 9.1. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТЕЛ

При изменении температуры размеры тел меняются: при нагревании, как правило, увеличиваются, при охлаждении уменьшаются. Отчего это происходит?

Увеличение размеров небольшого тела невелико и его трудно заметить. Но если взять железную проволоку длиной 1,5—2 м и нагревать её электрическим током, то удлинение можно обнаружить на глаз без специальных приборов. Для этого один конец проволоки должен быть закреплён, а другой перекинут через блок. К этому концу надо прикрепить груз, оттягивающий проволоку вниз (рис. 9.1). По указателю, соединённому с грузом, и судят об изменении длины проволоки в процессе её нагревания или охлаждения.

Расширение небольшого стального шара, нагретого на газовой горелке, можно заметить по его прохождению через

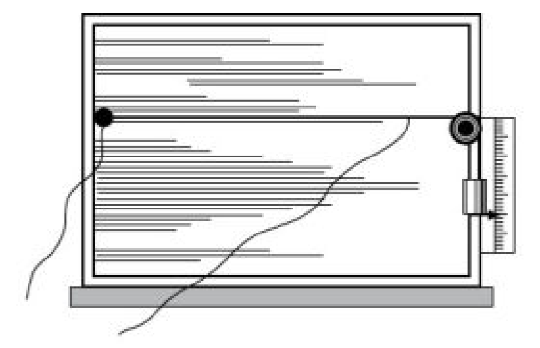


Рис. 9.1

кольцо. Холодный шар легко проходит через кольцо, а нагретый застревает в нём. Когда шар остынет, он снова проходит через кольцо.



Как же объяснить, почему тела при нагревании расширяются?

Молекулярная картина теплового расширения

Зависимость потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними позволяет выяснить причину возникновения теплового расширения. Как видно из рисунка 9.2, кривая потенциальной энергии сильно несимметрична. Она очень быстро (круто) возрастает от минимального значения E_{p0} (в точке r_0) при уменьшении r и сравнительно медленно растёт при увеличении r.

При абсолютном нуле в состоянии равновесия молекулы находились бы друг от друга на расстоянии r_0, соответствующем минимальному значению потенциальной энергии E_{p0}. По мере нагревания молекулы начинают совершать колебания около положения равновесия. Размах колебаний определяется средним значением энергии. Если бы потенциальная кривая была симметричной, то среднее положение молекулы по-прежнему соответствовало бы расстоянию r_0. Это означало бы общую неизменность средних расстояний между молекулами при нагревании и, следовательно, отсутствие теплового расширения. На самом деле кривая несимметрична. Поэтому при средней энер-

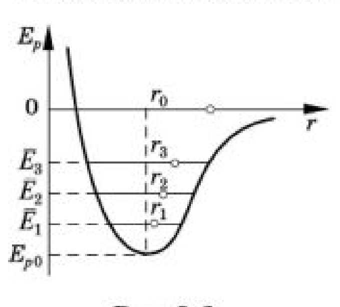


Рис. 9.2

гии, равной $\bar{E}_1$, среднее положение колеблющейся молекулы соответствует расстоянию $r_1 > r_0$.

Изменение среднего расстояния между двумя соседними молекулами означает изменение расстояния между всеми молекулами тела. Поэтому размеры тела увеличиваются.

Дальнейшее нагревание тела приводит к увеличению средней энергии молекулы до некоторого значения $\bar{E}_2$, $\bar{E}_3$ и т. д. При этом увеличивается и среднее расстояние между молекулами, так как теперь колебания совершаются с большей амплитудой вокруг нового положения равновесия: $r_2 > r_1$, $r_3 > r_2$ и т. д.

При нагревании тела среднее расстояние между колеблющимися молекулами увеличивается, поэтому увеличиваются и размеры тела.

? 1. Опишите эксперимент(-ы), доказывающий(-е), что объём твёрдых тел зависит от температуры.
2. Объясните тепловое расширение твёрдых тел с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

§ 9.2. ТЕПЛОВОЕ ЛИНЕЙНОЕ РАСШИРЕНИЕ

Применительно к твёрдым телам, форма которых при изменении температуры (при равномерном нагревании или охлаждении) не меняется, различают изменение линейных размеров (длины, диаметра и т. п.) — линейное расширение и изменение объёма — объёмное расширение. У жидкостей при нагревании форма может меняться (например, в термометре ртуть входит в капилляр). Поэтому в случае жидкостей имеет смысл говорить только об объёмном расширении.

Опыт показывает, что при небольших изменениях температуры изменение линейных размеров твёрдого тела прямо пропорционально изменению температуры (рис. 9.3). Так как удлинение при нагревании (или укорочение при охлаждении) зависит также от первоначальной длины тела, удобнее рассматривать не само удлинение тела, а относительное удлинение: отношение увеличения длины $\Delta l = l - l_0$ к перво-

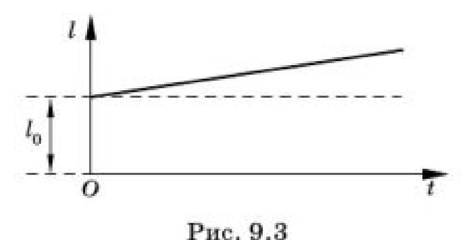


Рис. 9.3

начальной длине l_0. Относительное удлинение $\frac{\Delta l}{l_0}$ пропорционально изменению температуры $\Delta t = t - t_0$:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_1 \Delta t. \qquad (9.2.1)$$

Коэффициент пропорциональности α_1 называют **температурным коэффициентом линейного расширения**. Он показывает, на какую долю своего первоначального значения изменяются линейные размеры тела при нагревании его на 1 К. Коэффициент линейного расширения зависит от природы вещества, а также от температуры. Однако, если рассматривать изменения температуры в не слишком широких пределах, зависимостью α_1 от температуры можно пренебречь и считать температурный коэффициент линейного расширения величиной постоянной для данного вещества. Для большинства веществ этот коэффициент мал, его значения составляют 10^{-5}—10^{-6} $К^{-1}$.

Особенно мал коэффициент линейного расширения в диапазоне температур от −30 до +100 °С у инвара (сплав железа и никеля). Поэтому инвар применяют для изготовления точных инструментов, используемых при определении размеров тел. Линейные размеры самого инструмента из инвара мало зависят от колебаний температуры.

Линейные размеры тела, как вытекает из формулы (9.2.1), зависят от изменения температуры следующим образом:

$$l = l_0(1 + \alpha_1 \Delta t). \qquad (9.2.2)$$

В формулах (9.2.1) и (9.2.2) обычно начальное значение температуры полагают равным нулю (t_0 = 0 °С) и соответственно l_0 считают длиной тела при этой температуре. На практике же начальная температура тела далеко не всегда бывает равна 0 °С. Тогда расчёт длины тела при любой температуре можно выполнить так. Пусть при температуре t_1 длина тела равна l_1, а при температуре t_2 она

равна l_2. Тогда, считая начальную температуру $t_0 = 0$ °C, имеем

$$l_1 = l_0 (1 + \alpha_1 t_1),$$

$$l_2 = l_0 (1 + \alpha_1 t_2).$$

Отсюда

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{1 + \alpha_1 t_2}{1 + \alpha_1 t_1}$$

и

$$l_2 = l_1 \frac{1 + \alpha_1 t_2}{1 + \alpha_1 t_1}. \qquad (9.2.3)$$

Однако, учитывая, что значение α_1 очень мало, формулу (9.2.3) можно упростить. Умножив числитель и знаменатель на $1 - \alpha_1 t_1$, получим

$$l_2 = \frac{l_1[1 + \alpha_1 (t_2 - t_1) - \alpha_1^2 t_1 t_2]}{1 - \alpha_1^2 t_1^2}.$$

Ввиду малости коэффициента α_1 члены, содержащие α_1^2, малы по сравнению с членом, в который входит α_1 в первой степени (точнее, $\alpha_1 t \gg \alpha_1^2 t^2$). Поэтому их можно отбросить. В результате формула для вычисления длины l_2 оказывается более простой и достаточно точной для инженерной практики:

$$l_2 = l_1[1 + \alpha_1(t_2 - t_1)],$$

или

$$l_2 = l_1(1 + \alpha_1 \Delta t). \qquad (9.2.4)$$

Решая задачи с учётом теплового линейного расширения тел, необходимо иметь в виду, что при изменении температуры меняется не только длина, но и все другие линейные размеры тела. Так, у круглого стержня при нагревании увеличивается диаметр, и притом во столько раз, во сколько увеличивается длина стержня. У пластинки в одно и то же число раз увеличиваются длина, ширина и толщина. Если начертить на пластинке какую-нибудь линию, то длина этой линии при нагревании увеличится в такое же число раз. У окружности увеличатся её длина и диаметр.

При нагревании пластинки, имеющей круглое отверстие, диаметр отверстия тоже увеличится. Дело в том, что при равномерном нагревании в теле не возникают силы упругости. Поэтому расширение происходит так, как если бы пла-

стинка была сплошной. Точно так же увеличивается при нагревании диаметр гайки, размеры раковины в толще металлической отливки и т. д.

В справедливости сказанного можно убедиться на опыте с металлическим шаром, о котором уже шла речь в § 9.1. Шар застревает в кольце, если его нагреть, и проходит с большим зазором, если нагреть кольцо. Наоборот, при охлаждении кольца шар застревает, а охлаждение шара увеличивает зазор между ним и кольцом.

Линейные размеры твёрдых тел увеличиваются прямо пропорционально росту температуры.

? 1. Что показывает температурный коэффициент линейного расширения?
2. Изобразите графически зависимость линейного размера твёрдого тела от температуры.

§ 9.3. ТЕПЛОВОЕ ОБЪЁМНОЕ РАСШИРЕНИЕ

При изучении теплового объёмного расширения удобно, как и при линейном расширении, рассматривать относительное изменение объёма

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0}.$$

Измерения показывают, что в пределах не очень большого интервала температур можно считать, что относительное изменение объёма пропорционально изменению температуры:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha \Delta t = \alpha(t - t_0). \qquad (9.3.1)$$

Коэффициент пропорциональности α называют **температурным коэффициентом объёмного расширения**. Он показывает, на какую долю своего первоначального значения изменяется объём тела при изменении температуры на 1 К. Коэффициент объёмного расширения, как и коэффициент линейного расширения, зависит от природы вещества и температуры. Зависимость α от температуры незначительна и ею можно пренебречь, если интервал изменения температуры невелик. Для большинства твёрдых тел коэффициент α имеет порядок 10^{-5}—10^{-4} $К^{-1}$, т. е.

очень мал по сравнению с коэффициентом объёмного расширения газов.

Из формулы (9.3.1) легко найти выражение для объёма тела при любой температуре:

$$V = V_0(1 + \alpha\Delta t). \qquad (9.3.2)$$

В этой формуле значение начального объёма V_0 обычно берут при начальной температуре $t_0 = 0$ °C. Однако и здесь, как в случае линейного расширения, можно пользоваться формулой

$$V_2 = V_1(1 + \alpha\Delta t), \qquad (9.3.3)$$

где V_1 — объём тела при температуре t_1; V_2 — объём тела при температуре t_2; $\Delta t = t_2 - t_1$.

Объём полого (пустого) твёрдого тела (сосуда) при нагревании увеличивается так, как если бы это тело было сплошным. Объём полости в твёрдом теле (сосуде) при его нагревании увеличивается так, как увеличивался бы объём тела, изготовленного из того же вещества и имеющего форму и размер полости.

Связь между коэффициентами линейного и объёмного расширения

Коэффициент линейного расширения α_1 и коэффициент объёмного расширения α связаны между собой. Эту связь можно найти, рассматривая тепловое расширение тела простой формы, например кубика с ребром l_0. При нагревании кубика на Δt каждая его сторона увеличится на Δl и станет равной

$$l = l_0(1 + \alpha_1\Delta t). \qquad (9.3.4)$$

Объём тела при этом будет равен

$$V = V_0(1 + \alpha\Delta t).$$

Но $V_0 = l_0^3$ и $V = l^3$. Следовательно,

$$l^3 = l_0^3(1 + \alpha\Delta t)^3. \qquad (9.3.5)$$

Подставляя l из уравнения (9.3.4) в уравнение (9.3.5), получим

$$\alpha = 3\alpha_1 + 3\alpha_1^2\Delta t + \alpha_1^3(\Delta t)^2.$$

Так как величина α_1 очень мала, то при малых изменениях температуры членами $3\alpha_1^2\Delta t$ и $\alpha_1^3(\Delta t)^2$ можно пренебречь по сравнению с членом $3\alpha_1$. Поэтому

$$\alpha \approx 3\alpha_1. \qquad (9.3.6)$$

Итак, *температурный коэффициент объёмного расширения равен утроенному коэффициенту линейного расширения.*

Зависимость плотности вещества от температуры

При изменении температуры тел изменяется и их плотность. Пусть при температуре t_1 плотность вещества равна ρ_1, а объём тела равен V_1. При температуре t_2 значения этих величин стали соответственно равными ρ_2 и V_2. Так как при изменении температуры масса тела m не изменяется, то

$$\rho_1 = \frac{m}{V_1} \quad \text{и} \quad \rho_2 = \frac{m}{V_2}.$$

Разделив почленно второе равенство на первое, получим

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{V_1}{V_2},$$

отсюда

$$\rho_2 = \rho_1\frac{V_1}{V_2}.$$

Пользуясь формулой (9.3.3), можно записать

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1 + \alpha\Delta t}. \qquad (9.3.7)$$

Так как $\alpha\Delta t$ значительно меньше единицы, то для приближённых расчётов можно упростить эту формулу следующим образом:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1(1 - \alpha\Delta t)}{(1 + \alpha\Delta t)(1 - \alpha\Delta t)} = \frac{\rho_1(1 - \alpha\Delta t)}{1 - (\alpha\Delta t)^2}.$$

Пренебрегая выражением $(\alpha\Delta t)^2$ по сравнению с единицей, получим

$$\rho_2 = \rho_1(1 - \alpha\Delta t). \qquad (9.3.8)$$

При нагревании плотность вещества уменьшается.

Тепловое расширение жидкостей

Связи между частицами жидкости, как мы знаем, слабее, чем между молекулами в твёрдом теле. Поэтому следует ожидать, что при одинаковом нагревании жидкости расширяются в большей степени, чем твёрдые тела. Это действительно подтверждается на опыте.

Наполним колбу с узким и длинным горлышком подкрашенной жидкостью (водой или лучше керосином) до половины горлышка и отметим резиновым колечком уровень жидкости. После этого опустим колбу в сосуд с горячей водой. Сначала будет видно понижение уровня жидкости в горлышке колбы, а затем уровень начнёт повышаться и поднимется значительно выше начального. Это объясняется тем, что вначале нагревается сосуд и объём его увеличивается. Из-за этого уровень жидкости опускается. Затем нагревается жидкость. Расширяясь, она не только заполняет увеличившийся объём сосуда, но и значительно превышает этот объём. Следовательно, жидкости расширяются в большей степени, чем твёрдые тела.

Температурные коэффициенты объёмного расширения жидкостей значительно больше коэффициентов объёмного расширения твёрдых тел; они могут достигать значения 10^{-3} $К^{-1}$.

Жидкость нельзя нагреть, не нагревая сосуда, в котором она находится. Поэтому мы не можем наблюдать истинного расширения жидкости в сосуде, так как расширение сосуда занижает видимое увеличение объёма жидкости. Впрочем, коэффициент объёмного расширения стекла и других твёрдых тел обычно значительно меньше коэффициента объёмного расширения жидкости, и при не очень точных измерениях увеличением объёма сосуда можно пренебречь.

Особенности расширения воды

Наиболее распространённая на Земле жидкость — вода — обладает особыми свойствами, отличающими её от других жидкостей. У воды при нагревании от 0 до 4 °С объём не увеличивается, а уменьшается. Лишь с 4 °С объём воды начинает при нагревании возрастать. При 4 °С, таким образом, объём воды минимален, а плотность максимальна*. На ри-

* Эти данные относятся к пресной (химически чистой) воде. У морской воды наибольшая плотность наблюдается примерно при 3 °С.

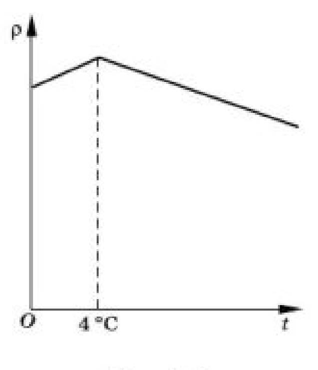


Рис. 9.4

сунке 9.4 показана примерная зависимость плотности воды от температуры.

Отмеченное особое свойство воды оказывает большое влияние на характер теплообмена в водоёмах. При охлаждении воды вначале плотность верхних слоёв увеличивается, и они опускаются вниз. Но после достижения воздухом температуры 4 °C дальнейшее охлаждение уже уменьшает плотность, и холодные слои воды остаются на поверхности. В результате в глубоких водоёмах даже при очень низкой температуре воздуха вода имеет температуру около 4 °C.

Объём жидких и твёрдых тел увеличивается прямо пропорционально росту температуры. У воды обнаруживается аномалия: её плотность максимальна при 4 °C.

? **1.** Что показывает температурный коэффициент объёмного расширения?

2. Как связаны коэффициенты линейного и объёмного расширения?

3. Каким образом плотность вещества зависит от температуры?

4. Опишите тепловое расширение жидкостей.

5. Поясните «аномальное поведение» воды при изменении температуры.

§ 9.4. УЧЁТ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ТЕЛ В ТЕХНИКЕ

Хотя линейные размеры и объёмы тел при изменении температуры меняются мало, тем не менее это изменение нередко приходится учитывать в практике; в то же время это явление широко используется в быту и технике.

Учёт теплового расширения тел

Изменение размеров твёрдых тел вследствие теплового расширения приводит к появлению огромных сил упругости, если другие тела препятствуют этому изменению разме-

ров. Например, стальная мостовая балка сечением 100 см^2 при нагревании от −40 °С зимой до +40 °С летом, если опоры препятствуют её удлинению, создаёт давление на опоры (напряжение) до $1{,}6 \cdot 10^8$ Па, т. е. действует на опоры с силой $1{,}6 \cdot 10^6$ Н.

Приведённые значения могут быть получены из закона Гука и формулы (9.2.1) для теплового расширения тел.

Согласно закону Гука механическое напряжение $\sigma = \frac{F}{S} = E\varepsilon$, где $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ — относительное удлинение, а E — модуль Юнга. Согласно (9.2.1) $\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon = \alpha_1 \Delta t$. Подставляя это значение относительного удлинения в формулу закона Гука, получим

$$\sigma = E\alpha_1 \Delta t. \qquad (9.4.1)$$

У стали модуль Юнга $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па, температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_1 = 9 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$. Подставив эти данные в выражение (9.4.1), получим, что при $\Delta t = 80$ °С механическое напряжение $\sigma = 1{,}6 \cdot 10^8$ Па.

Так как $S = 10^{-2}$ м^2, то сила $F = \sigma S = 1{,}6 \cdot 10^6$ Н.

Для демонстрации сил, появляющихся при охлаждении металлического стержня, можно проделать следующий опыт. Нагреем железный стержень с отверстием на конце, в которое вставлен чугунный стерженёк (рис. 9.5). Затем вставим этот стержень в массивную металлическую подставку с пазами. При охлаждении стержень сокращается, и в нём возникают столь большие силы упругости, что чугунный стерженёк ломается.

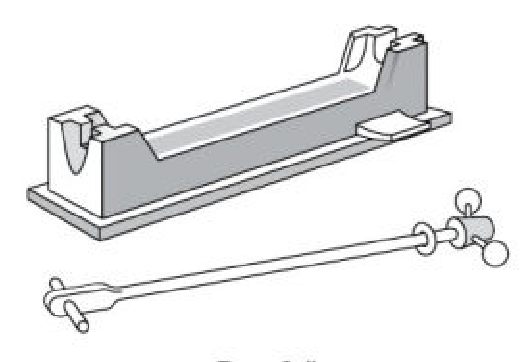


Рис. 9.5



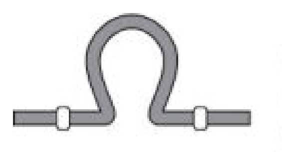


Рис. 9.6

Тепловое расширение тел нужно учитывать при конструировании многих сооружений. Необходимо принимать меры для того, чтобы тела могли свободно расширяться или сжиматься при изменении температуры.

Нельзя, например, туго натягивать телеграфные провода, а также провода линий электропередачи (ЛЭП) между опорами. Летом провисание проводов заметно больше, чем зимой.

Металлические паропроводы, а также трубы водяного отопления приходится снабжать изгибами (компенсаторами) в виде петель (рис. 9.6).

Внутренние напряжения могут возникать при неравномерном нагревании однородного тела. Например, стеклянная бутылка или стакан из толстого стекла могут лопнуть, если в них налить горячую воду. В первую очередь происходит нагрев внутренних частей сосуда, соприкасающихся с горячей водой. Они расширяются и оказывают сильное давление на внешние холодные части. Поэтому может произойти разрушение сосуда. Тонкий же стакан не лопается при наливании в него горячей воды, так как его внутренняя и внешняя части одинаково быстро прогреваются.

Очень малый температурный коэффициент линейного расширения имеет кварцевое стекло. Такое стекло выдерживает, не трескаясь, неравномерное нагревание или охлаждение. Например, в раскалённую докрасна колбочку из кварцевого стекла можно вливать холодную воду, тогда как колба из обычного стекла при таком опыте лопается.

Разнородные материалы, подвергающиеся периодическому нагреванию и охлаждению, следует соединять вместе только тогда, когда их размеры при изменении температуры меняются одинаково. Это особенно важно при больших размерах изделий. Так, например, железо и бетон при нагревании расширяются одинаково. Именно поэтому широкое распространение получил железобетон — затвердевший бе-

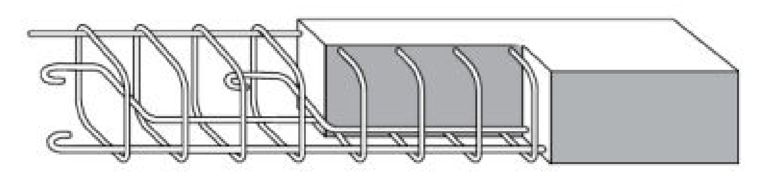


Рис. 9.7

тонный раствор, залитый в стальную решётку — арматуру (рис. 9.7). Если бы железо и бетон расширялись по-разному, то в результате суточных и годовых колебаний температуры железобетонное сооружение вскоре бы разрушилось.

Ещё несколько примеров. Металлические проводники, впаянные в стеклянные баллоны электроламп и радиоламп, делают из сплава (железа и никеля), имеющего такой же коэффициент расширения, как и стекло, иначе при нагревании металла стекло треснуло бы. Эмаль, которой покрывают посуду, и металл, из которого эта посуда изготовляется, должны иметь одинаковый коэффициент линейного расширения. В противном случае эмаль будет лопаться при нагревании и охлаждении покрытой ею посуды.



Значительные силы могут развиваться и жидкостью, если нагревать её в замкнутом сосуде, не позволяющем жидкости расширяться. Эти силы могут привести к разрушению сосудов, в которых содержится жидкость, поэтому с этим свойством жидкости тоже приходится считаться. Например, системы труб водяного отопления всегда снабжаются расширительным баком, присоединённым к верхней части системы и сообщающимся с атмосферой. При нагревании воды в системе труб небольшая часть воды переходит в расширительный бак, и этим исключается напряжённое состояние воды и труб. По этой же причине в силовом трансформаторе с масляным охлаждением наверху имеется расширительный бак для масла. При повышении температуры уровень масла в баке повышается, при охлаждении масла — понижается.

Использование теплового расширения в технике

Тепловое расширение тел находит широкое применение в технике. Приведём лишь несколько примеров. Две разнородные пластинки (например, железная и медная), сваренные вместе, образуют так называемую биметаллическую пластинку (рис. 9.8). При нагревании такие пластинки изгибаются вследствие того, что одна расширяется сильнее другой. Та из полосок (медная), которая расширяется больше, оказывается всегда с выпуклой стороны (рис. 9.9). Это свой-

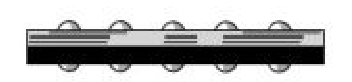


Рис. 9.8



Рис. 9.9

ство биметаллических пластинок широко используется для измерения температуры и её регулирования.

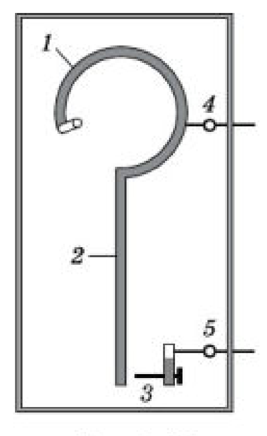


Рис. 9.10

Терморегулятор

На рисунке 9.10 схематически изображено устройство одного из типов регуляторов температуры. Биметаллическая дуга *1* при изменении температуры изменяет свою кривизну. К её свободному концу прикреплена металлическая пластинка *2*, которая при раскручивании дуги прикасается к контакту *3*, а при закручивании отходит от него. Если, например, контакт *3* и пластинка *2* присоединены к концам *4*, *5* электрической цепи, содержащей нагревательный прибор, то при соприкосновении контакта и пластинки электрическая цепь замкнётся: прибор начнёт нагревать помещение. Биметаллическая дуга *1* при нагревании начнёт закручиваться и при определённой температуре отсоединит пластинку *2* от контакта *3*: цепь разорвётся, нагревание прекратится. При охлаждении дуга *1*, раскручиваясь, снова заставит включиться нагревательный прибор. Таким образом, температура помещения будет поддерживаться на данном уровне. Подобный терморегулятор устанавливают в инкубаторах, где требуется поддерживать температуру постоянной. В быту терморегуляторы установлены в холодильниках, электроутюгах и т. д.

Обод (бандаж) колеса железнодорожного вагона изготавливают из стали, остальную часть колеса делают из более дешёвого металла — чугуна. Бандажи на колёса надевают в нагретом состоянии. После охлаждения они сжимаются и поэтому держатся прочно.

Также в нагретом состоянии надевают шкивы, подшипники на валы, железные обручи на деревянные бочки и т. д. Свойство жидкостей расширяться при нагревании и сжиматься при охлаждении используется в приборах, служащих для измерения температуры — термометрах. В качестве жидкостей для изготовления термометров применяют ртуть, спирт и др.

При расширении или сжатии тел возникают огромные механические напряжения, если другие тела препят-

ствуют изменению размеров. В технике используются биметаллические пластинки, изменяющие свою форму при нагревании.

§ 9.5. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1

Диаметр стеклянной пробки, застрявшей в горлышке флакона, $d_0 = 2{,}5$ см. Чтобы вынуть пробку, горлышко нагрели до температуры $t_1 = 150$ °C. Сама пробка успела при этом нагреться до температуры $t_2 = 50$ °C. Как велик образовавшийся зазор? Температурный коэффициент линейного расширения стекла $\alpha_1 = 9 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$.

Решение. Обозначим начальную температуру стеклянного флакона и застрявшей в нём пробки через t_0. Тогда после нагревания диаметр горлышка флакона будет

$$d_1 = d_0[1 + \alpha_1(t_1 - t_0)],$$

а диаметр пробки

$$d_2 = d_0[1 + \alpha_1(t_2 - t_0)].$$

Образовавшийся зазор между пробкой и горлышком составит

$$l = \frac{d_1 - d_2}{2} = \frac{d_0\alpha_1(t_1 - t_2)}{2}.$$

Подставляя числовые значения величин, найдём

$$l = 0{,}01 \text{ мм}.$$

Задача 2

Объём некоторой массы спирта при нагревании увеличился на $\Delta V = 5{,}5$ см^3. Начальная плотность спирта $\rho_0 = 800$ кг/м^3, температурный коэффициент объёмного расширения спирта $\alpha = 1{,}1 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$. Удельная теплоёмкость спирта $c = 2{,}4 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К). Какое количество теплоты сообщено спирту?

Решение. Первоначальный объём спирта V_0. После нагревания он стал равен $V = V_0(1 + \alpha\Delta t)$. Изменение объёма спирта

$$\Delta V = V - V_0 = V_0\alpha\Delta t. \qquad (9.5.1)$$

Количество теплоты, сообщённое спирту при нагревании,

$$Q = cm\Delta t, \qquad (9.5.2)$$

где $m = \rho_0 V_0$ — масса спирта.

Разделив почленно выражения (9.5.1) и (9.5.2), получим

$$\frac{\Delta V}{Q} = \frac{\alpha}{c\rho_0},$$

отсюда

$$Q = \frac{\Delta V c \rho_0}{\alpha} = 9600 \text{ Дж}.$$

Задача 3

Как велика сила F, которую нужно приложить к медной проволоке с площадью поперечного сечения $S = 10$ мм^2, чтобы растянуть её на столько же, на сколько она удлиняется при нагревании на $\Delta t = 20$ К? Коэффициент линейного расширения меди $\alpha_1 = 1{,}7 \cdot 10^{-5}$ К$^{-1}$, модуль Юнга $E = 1{,}2 \cdot 10^{11}$ Па.

Решение. Согласно закону Гука $\sigma = E\varepsilon$ или $\frac{F_у}{S} = E\frac{\Delta l}{l_0}$, где $F_у$ — сила упругости, возникающая в проволоке при её относительном удлинении $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, а E — модуль упругости (модуль Юнга) меди. Приложенная к проволоке сила равна по модулю силе упругости, поэтому

$$\frac{F}{S} = E\frac{\Delta l}{l_0}.$$

Отсюда

$$\Delta l = \frac{F l_0}{ES}. \qquad (9.5.3)$$

Согласно условию задачи проволока должна получить такое же удлинение при нагревании на Δt:

$$\Delta l = l_0 \alpha_1 \Delta t. \qquad (9.5.4)$$

Подставив в уравнение (9.5.3) выражение (9.5.4) для Δl, получим выражение для силы:

$$F = ES\alpha_1 \Delta t = 410 \text{ Н}.$$

Задача 4

Определите длины l_0' и l_0'' железной и медной линеек при температуре $t_0 = 0$ °С, если разности их длин при температурах $t_1 = 50$ °С и $t_2 = 450$ °С одинаковы по модулю и равны $l = 2$ см. Коэффициенты линейного расширения железа и меди соответственно равны $\alpha_1' = 1{,}2 \cdot 10^{-5}$ К$^{-1}$ и $\alpha_1'' = 1{,}7 \cdot 10^{-5}$ К$^{-1}$.

Решение. Разность длин линеек при температуре t_1 равна

$$l_0'(1 + \alpha_1' t_1) - l_0''(1 + \alpha_1'' t_1) = l.$$

При температуре t_2 эта разность равна

$$l_0'(1 + \alpha_1' t_2) - l_0''(1 + \alpha_1'' t_2) = \pm l.$$

Знак «плюс» соответствует случаю, когда разность длин линеек остаётся неизменной (рис. 9.11, *а*). Знаку «минус» соответствует случай, когда при температурах t_1 и t_2 разности длин линеек одинаковы по модулю, но противоположны по знаку (рис. 9.11, *б*).

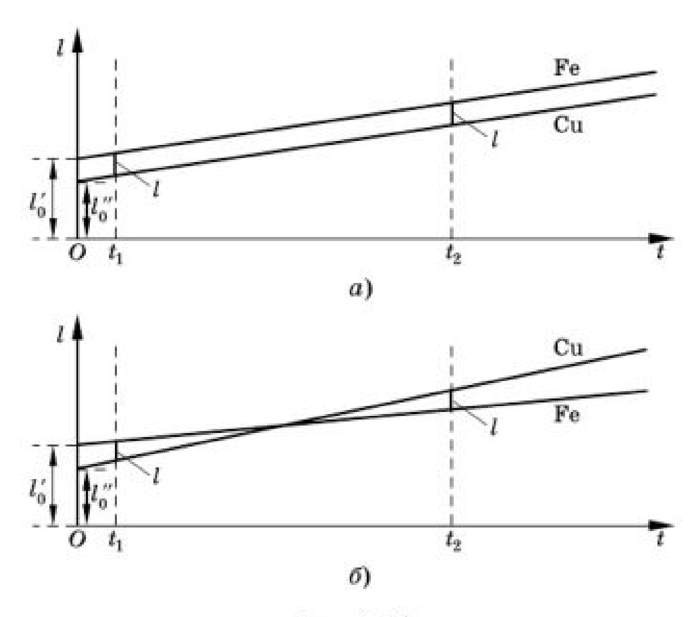


Рис. 9.11

В первом случае система уравнений приводит к следующим результатам:

$$l'_{0(1)} = \frac{\alpha''_1}{\alpha''_1 - \alpha'_1} l = 6{,}8 \text{ см},$$

$$l''_{0(1)} = \frac{\alpha'_1}{\alpha''_1 - \alpha'_1} l = 4{,}8 \text{ см}.$$

Во втором случае результаты получаются такими:

$$l'_{0(2)} = \frac{2 + \alpha''_1(t_1 + t_2)}{(t_2 - t_1)(\alpha''_1 - \alpha'_1)} l \approx 2008 \text{ см},$$

$$l''_{0(2)} = \frac{2 + \alpha''_1(t_1 + t_2)}{(t_2 - t_1)(\alpha''_1 - \alpha'_1)} l \approx 2006 \text{ см}.$$

В обоих случаях при $t_0 = 0$ °C длина железной линейки должна быть больше медной.

Задача 5

При температуре $t_0 = 0$ °C стеклянный баллон вмещает $m_0 = 100$ г ртути. При температуре $t_1 = 20$ °C баллон вмещает $m_1 = 99{,}7$ г ртути. В обоих случаях температура ртути равна температуре баллона. Найдите по этим данным температурный коэффициент линейного расширения стекла α_1, учитывая, что коэффициент объёмного расширения ртути $\alpha = 1{,}8 \cdot 10^{-4}$ К$^{-1}$.

Решение. Если вместимость баллона при 0 °C обозначить через V_0, то при температуре t_1 она будет равна

$$V_1 = V_0(1 + 3\alpha_1 t_1). \qquad (9.5.5)$$

Обозначим через ρ_0 и ρ_1 плотности ртути при температурах t_0 и t_1. Тогда массы ртути при начальной и конечной температурах будут равны $m_0 = \rho_0 V_0$ и $m_1 = \rho_1 V_1$, причём согласно формуле (9.3.7)

$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{1 + \alpha t_1}.$$

Отсюда $V_0 = \frac{m_0}{\rho_0}$ и $V_1 = \frac{m_1}{\rho_1} = \frac{m_1(1 + \alpha_1 t_1)}{\rho_0}$.

Из выражения (9.5.5) находим

$$\alpha_1 = \frac{V_1 - V_0}{3V_0 t_1}. \qquad (9.5.6)$$

Подставляя в уравнение (9.5.6) значения V_0 и V_1, окончательно получим

$$\alpha_1 = \frac{m_1(1 + \alpha t_1) - m_0}{m_0 t_1} = 10^{-5}\ \text{К}^{-1}.$$

Упражнение 8

1. Как должны относиться длины l_1 и l_2 двух стержней, сделанных из разных материалов, с температурными коэффициентами линейного расширения α_1' и α_1'', чтобы при любой температуре разность длин стержней оставалась одинаковой?
2. Стальная балка наглухо закреплена между двумя стенами при температуре $t_0 = 0$ °С. При повышении температуры до $t_1 = 10$ °С она производит на стены давление $p_1 = 3 \cdot 10^7$ Па. Какое давление p_2 будет оказывать на стены балка при температуре $t_2 = 25$ °С?
3. Из металлического диска вырезан сектор (рис. 9.12). Что произойдёт с углом φ при нагревании диска?
4. Медный лист размером 60×50 см при 20 °С нагревается до 600 °С. Как изменится его площадь? Температурный коэффициент линейного расширения меди $\alpha_1 = 1{,}7 \cdot 10^{-5}\ \text{К}^{-1}$.
5. Какое количество теплоты надо израсходовать, чтобы стальной рельс длиной 10 м и площадью поперечного сечения 20 см^2 удлинился на 6 мм? Плотность стали $\rho = 7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3. Температурный коэффициент линейного расширения $1{,}2 \cdot 10^{-5}\ \text{К}^{-1}$. Удельная теплоёмкость стали $c = 460$ Дж/(кг · К).
6. Латунный сосуд при нагревании увеличился в объёме на $n = 0{,}6\%$. На сколько градусов был нагрет сосуд, если температурный коэффициент линейного расширения латуни $\alpha_1 = 2 \cdot 10^{-5}\ \text{К}^{-1}$?
7. Сообщающиеся сосуды заполнены жидкостью, имеющей температуру t_1. При нагревании жидкости в одном из сосудов до температу-

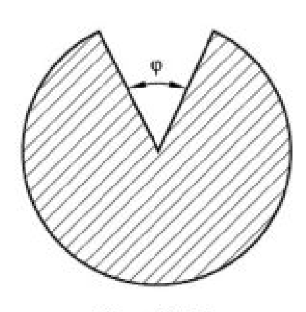


Рис. 9.12

ры t_2 уровень жидкости в этом сосуде установился на высоте h_1, а в другом сосуде — на высоте h_2. Найдите температурный коэффициент объёмного расширения жидкости α.

8. Определите объём шарика ртутного термометра, если известно, что при температуре $t_0 = 0$ °C ртуть заполняет шарик целиком, а объём канала между делениями, соответствующими 0 °C и 100 °C, равен $V = 3$ мм^3. Температурный коэффициент объёмного расширения ртути $\alpha = 1{,}8 \cdot 10^{-4}$ К$^{-1}$, температурный коэффициент линейного расширения стекла $\alpha_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$.

9. В кварцевый сосуд объёмом $V = 2{,}5$ л помещён латунный цилиндр, масса которого $m = 8{,}5$ кг. Остальная часть сосуда заполнена водой. При нагревании сосуда вместе с содержимым на $\Delta t = 3$ К уровень воды в сосуде не изменился. Найдите температурный коэффициент объёмного расширения воды. Температурный коэффициент линейного расширения кварца $\alpha_1 = 4{,}2 \cdot 10^{-7}$ К$^{-1}$, латуни $\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ К$^{-1}$. Плотность латуни $\rho = 8{,}5 \cdot 10^3$ кг/м^3.

---

1. Почему в настоящее время существует большое количество различных термометров (ответ представьте в виде таблицы)? Сделайте презентацию различных термометров.
2. Подготовьте доклад «Тепловое расширение тел: учёт и использование в технике».
3. Свойственно ли человеку тепловое расширение? Ответ аргументируйте.

ТЕМЫ ПРОЕКТОВ

1. Представьте фотоматериалы, доказывающие основные положения МКТ в живой и неживой природе.
2. Сконструируйте волосяной гигрометр. Определите оптимальные условия его функционирования.
3. Оцените давление под искривлённой поверхностью жидкости (растительное масло — оливковое, подсолнечное).
4. Оцените механическое напряжение, возникающее в ножках стула, на котором вы сидите.

ОБОБЩАЮЩИЕ ПРОЕКТЫ

1. Сделайте презентацию (по материалам художественных произведений, на основе анализа живописи, современного кинематографа, мультипликационных фильмов), демонстрирующую проявление различных физических явлений.
2. Сделайте рекламу альтернативных автомобильных двигателей.
3. Подготовьте социальную акцию, посвящённую проблеме охраны окружающей среды.
4. Создайте хронологическую ленту «Открытия в молекулярной физике и термодинамике: причины, личность учёного, появление технологий, окружающая среда».

ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ

http://gotourl.ru/8065

http://gotourl.ru/8066

http://gotourl.ru/8067

http://gotourl.ru/8068

http://gotourl.ru/8069

ОТВЕТЫ К УПРАЖНЕНИЯМ

Упражнение 1

1. $\approx 1{,}7 \cdot 10^{-9}$ м.
2. NO_2.
3. $8\left(\frac{r}{d}\right)^2 = 5 \cdot 10^5$.
4. 23; $2{,}3 \cdot 10^{-2}$ кг/моль; 28; $2{,}8 \cdot 10^{-2}$ кг/моль;
30; $3{,}0 \cdot 10^{-2}$ кг/моль; 160; 0,16 кг/моль.
5. 50 моль.
6. 1,8 кг.
7. $\approx 6{,}7 \cdot 10^{-27}$ кг; $\approx 5 \cdot 10^{-26}$ кг; $\approx 2{,}7 \cdot 10^{-26}$ кг.
8. Примерно $4 \cdot 10^{18}$ молекул.
9. $2{,}0 \cdot 10^{25}$.
10. Около 5000.
11. $N = \frac{lS\rho}{M} N_A = 3{,}2 \cdot 10^{22}$.
12. $S = \frac{m}{n}\sqrt[3]{\frac{N_A}{M\rho^2}} \approx 2 \cdot 10^{-2}$ м^2.

Упражнение 2

2. Нагретый термометр соприкасается со сравнительно холодным воздухом комнаты. Из-за большой разности температур ртуть охлаждается достаточно быстро и термометр удаётся стряхнуть почти тотчас же.

3. $l = \frac{(2p_0 - \rho gh)(2L - h)}{4(p_0 + \rho gh)}$.

4. $p_2 = \frac{(p_1 + \rho gh_1)l}{h_1 + l - h_2} + \rho gh_2 \approx 100$ кПа $= 750$ мм рт. ст.

5. $l = \frac{V}{nS}\left(\frac{p}{p_0} - 1\right) = 0{,}4$ м.

6. $m_1 = \frac{p_0 S}{g} + m$.

7. На 4%.

8. $T_2 = \frac{mT_1}{V_1\rho_2} = 225$ К или $t_2 = -48$ °C.

9. $T_1 = 2T_2\frac{16r^3 - 3ld^2}{32r^3 + 3ld^2} = 320$ К или $t_1 = 47$ °C.

10. $T_2 = \frac{p + p_0 - \Delta p}{p + p_0}T_1 = 256$ К или $t_2 = -17$ °C.

11. $p = \frac{T}{2}\left(\frac{p_1}{T_1} + \frac{p_2}{T_2}\right)$.

12. $T_2 = \frac{(p_0 + \Delta p)(1 + n)T_1}{p_1} = 255$ К или $t_2 = -18$ °C.

13. $m = \frac{MV}{R}\left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2}\right) \approx 0{,}019$ кг $= 19$ г.

14. $T_3 = \frac{T_2^2}{T_1}$.

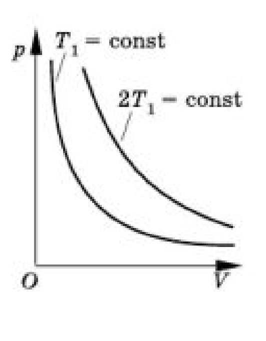
15. $m_{\text{вып}} = \frac{pVM_{H_2}}{RT} - \frac{mM_{H_2}}{M_{H_2O}} \approx 77$ г.

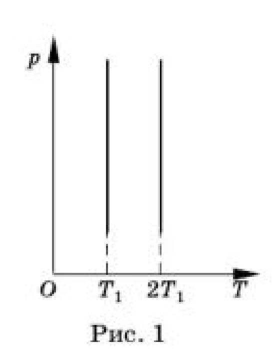
16. $p_2 = T_2\left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{mR}{MV}\right) \approx 3{,}6 \cdot 10^5$ Па.

17. $p_2 = 2p_1\frac{V_1}{V_2}\frac{T_2}{T_1} \approx 8 \cdot 10^5$ Па.

18. $p = p_0\frac{V_1 + V_2}{T}\left(\frac{V_1}{T_1} + \frac{V_2}{T_2}\right)^{-1} \approx 842$ мм рт. ст.

19. См. рисунок 1.





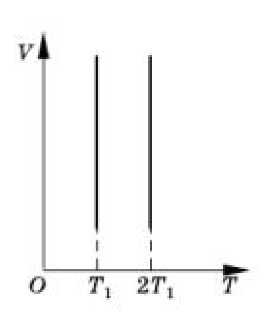


Рис. 1

20. См. рисунок 2.

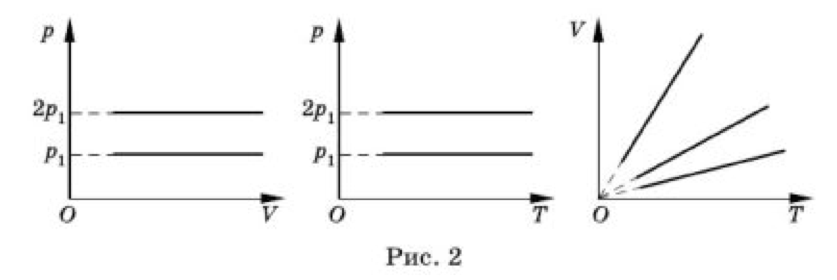
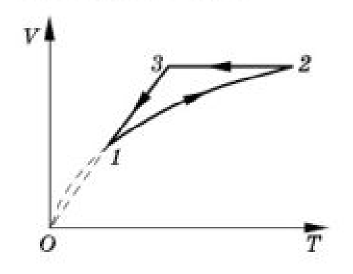


Рис. 2

21. См. рисунок 3.



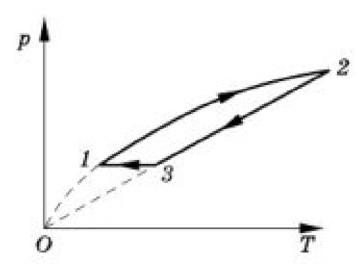


Рис. 3

Упражнение 3

1. $t = 153$ °C.
2. $F = n_0 m_0 \overline{\quad}\ S$; $p = n_0 m_0 \overline{v^2}$.
3. 26,6 кПа.
4. $2{,}7 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$.
5. 0,75 кг/м^3.
6. 1800 м/с.
7. $3 \cdot 10^{22}$.
8. $N = \dfrac{p_0 V_0 (T_2 - T_1)}{k T_1 T_2}$, где k — постоянная Больцмана.
9. $n_1 = \dfrac{\rho R T - p M_{H_2}}{kT(M_{N_2} - M_{H_2})} \approx 3{,}5 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$;

$n_2 = \dfrac{p M_{H_2} - \rho R T}{kT(M_{N_2} - M_{H_2})} \approx 4{,}2 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$.

10. Приблизительно через 8500 лет.
11. На 183 К.
12. Не изменится.
13. Увеличится на 7,2 Дж.

Упражнение 4

4. $A' = (pS + mg)h\dfrac{\Delta T}{T} = 30$ Дж.

5. $T_0 = T + \dfrac{AM_{\text{He}}}{m_1 R} \approx 289$ К; $V_0 = \dfrac{m_1 R T_0}{M_{\text{He}}\left(p_0 + \dfrac{mg}{S}\right)} = 0{,}028$ м³.

6. $Q_1 = \dfrac{C_p A}{R} \approx 10^4$ Дж.

7. $l = \dfrac{c_в \rho_в V(t - t_0)}{S\rho_м c_м (t_1 - t)} \approx 0{,}5$ м.

8. $c_1 = \dfrac{c_2 m_2 (t_2 - t)}{m_1 (t - t_1)} - \dfrac{C}{m_1} \approx 2{,}17$ кДж/(кг · К).

9. $\Delta T = \dfrac{2gh - \upsilon^2}{2c} = 8$ К.

10. $Q = \dfrac{Mm\upsilon_0^2}{2(M + m)}$.

11. $\Delta t = \dfrac{\upsilon^2}{4c} = 19$ °С.

13. $A = \dfrac{m}{M}R\Delta T = 2590$ Дж; $\Delta U = Q_1 - A = 6570$ Дж.

14. $\Delta U = -A' = -4470$ Дж; $t_2 = t_1 + \dfrac{\Delta U}{mc_V} = -10$ °С.

15. $Q = \Delta U = \dfrac{5}{2}V\Delta p \approx 1{,}65 \cdot 10^4$ Дж; $A = 0$.

16. $\Delta U = Q = \dfrac{3}{2}\dfrac{pV}{T}\Delta T \approx 155$ Дж.

17. На участке *1—2* $A_1' < 0$ и $Q < 0$; на участке *2—3* $A_2' > 0$ и $Q > 0$; на участке *3—1* $A_3' = 0$ и $Q < 0$. В процессе *1—2—3—1* $A_4' > 0$ и $Q > 0$. График зависимости p от V представлен на рисунке 4 (см. с. 344).

18. Зависимость p от V изображена на рисунке 5 (см. с. 344). Наибольшая работа, численно равная площади заштрихованной на рисунке фигуры, совершена при изотермическом процессе *1—2*.

19. $A = p_1 V_1 \dfrac{T_3 - T_2}{T_1} = 100$ Дж.

20. $Q = W_\tau + cmt$.

21. $T_2 = 0{,}67T_1 \approx 288$ К.

22. $A_{\max} = \left(1 - \dfrac{T_2}{T_1}\right)Q = 707$ Дж.

23. $c = \dfrac{mgHT_1}{\rho V(T_2 - T_1)^2} = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К).

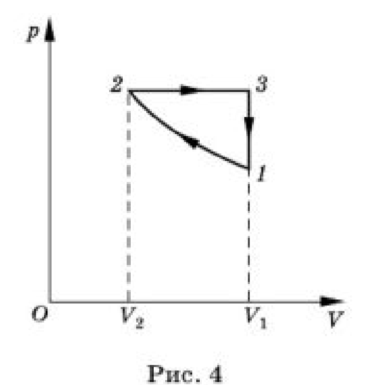


Рис. 4

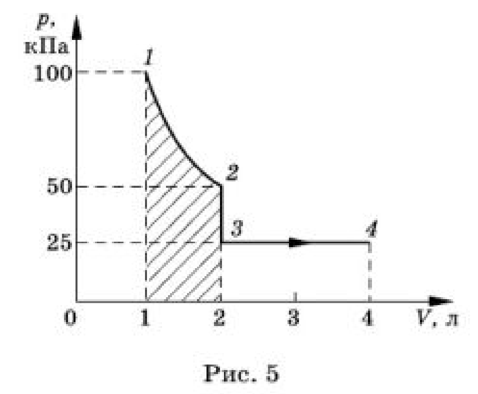


Рис. 5

Упражнение 5

3. Охлаждение нижнего шара вызывает в нём усиленную конденсацию паров. Это, в свою очередь, вызывает быстрое испарение воды в верхнем шаре. При этом в верхнем шаре температура воды падает настолько сильно, что она замерзает.

4. По условию задачи относительная влажность и на улице, и в комнате близка к 100%. Однако давление насыщенных паров воды на улице гораздо меньше, чем в комнате, так как температура воздуха в комнате выше, а для выравнивания давлений за счёт проникновения паров сквозь щели наружу требуется значительное время. Поэтому при открывании форточки пары начнут интенсивно проникать из комнаты наружу, и бельё высохнет быстрее.

5. В левом шаре над спиртом находится его насыщенный пар. Рука нагревает этот пар, вследствие чего давление этого пара над спиртом в левом шаре становится больше давления пара в правом шаре. Под действием разности давлений спирт перегоняется в правый шар. Нагретый ладонью пар «прорывается» сквозь спирт, вызывая «кипение».

6. Можно, если состояние газа будет изменяться так, как показано на рисунке 6.

7. 1) Уровни воды сравняются, как в сообщающихся сосудах. Водяные пары в левом сосуде будут частично конденсироваться, а в правом сосуде часть воды испарится.

2) Уровни сравняются в результате перетекания паров из одного сосуда в другой. При данной температуре давление насыщенных паров одинаково в обоих сосудах у поверхности жидкости и убывает одинаковым образом с высотой. Поэтому давление паров на одном и том же уровне не одинаково, что и приводит к перетеканию пара и последующей конденсации его в сосуде с низким уровнем воды.

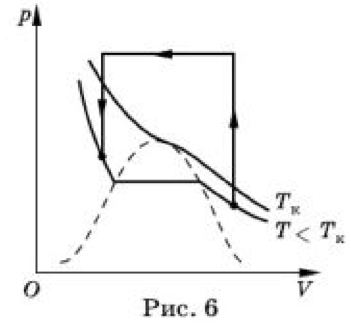


Рис. 6

8. Нагревание при постоянном объёме V_0 приводит к тому, что жидкость расширится и заполнит весь сосуд (это состояние изображается точкой пересечения изохоры со штриховой линией). При дальнейшем нагревании в сосуде будет только жидкость, которая плавно переходит в газ при температуре, большей критической.

Нагревание при критическом объёме $V_к$ описано в § 6.4.

Нагревание при постоянном объёме V_1 приводит к испарению жидкости и постепенному понижению её уровня. При давлении, соответствующем точке пересечения изохоры и штриховой линии на диаграмме, жидкость исчезнет, останется только пар, давление которого при дальнейшем нагревании будет расти согласно закону Шарля.

9. В глубокой шахте температура воды выше, а удельная теплота парообразования меньше.

10. Сам водяной пар невидим. Мы можем наблюдать только облако мельчайших капель, возникающих после конденсации. При выключении газа исчезают струи нагретого воздуха, ранее обтекавшие чайник. При этом выходящий из чайника водяной пар охлаждается и конденсируется.

11. $m_2 = m_1 = 20$ кг; $p = \dfrac{m_2RT}{MV} = 0{,}84$ МПа.

12. $m = \dfrac{m_0RT - p_1V_1M_1}{nRT} = 0{,}02$ кг;

$p = \dfrac{p_1V_1(M_2 - M_1) + m_0RT}{M_2V_1} = 27{,}2$ кПа.

13. 319 К.

14. 0,8 кг.

15. $\rho = \dfrac{M_p}{RT} = 91$ г/м^3.

16. $m = (\rho_1\varphi_1 - \rho_2)V = 0{,}79$ кг.

17. 916 кг.

18. 68%.

Упражнение 6

1. $A = 2\pi\sigma D^2 = 3{,}6 \cdot 10^{-3}$ Дж.

2. $F = 0{,}11$ Н.

3. Максимальный термометр можно осуществить следующим образом. Вне столбика жидкости горизонтально расположенного термометра (рис. 7) поместить небольшое не смачиваемое жидкостью тело, которое может свободно перемещаться вдоль трубки тер-



Рис. 7

мометра. Положение тела укажет максимальную температуру, так как при расширении жидкости тело будет перемещаться вдоль трубки, а при сжатии останется на месте.

Аналогично можно осуществить и минимальный термометр. Для этого смачиваемое жидкостью термометра тело нужно поместить внутрь жидкости.

4. Поверхностное натяжение чистого бензина меньше, чем поверхностное натяжение бензина, в котором растворён жир. Поэтому при смачивании бензином краёв пятна оно стягивается к центру. При смачивании же самого пятна оно будет растекаться по ткани.

5. Внутри кожи имеется большое количество капилляров. Внутри капилляра постоянного сечения капелька смачивающей жидкости будет находиться в равновесии. Нагревание жидкости уменьшает поверхностное натяжение. Поэтому жидкость втягивается в сторону холодной части капилляра. Ботинки надо нагревать снаружи.

6. Жир расплавляется, и силы поверхностного натяжения перемещают его на поверхность холодной ткани, подложенной под костюм (см. задачу 5).

7. Часть полена в тени холоднее. Поэтому силы поверхностного натяжения перемещают воду в этом направлении.

8. $\Delta p = \frac{8\sigma}{D} = 32$ Па.

9. Будет, пока воздух не перейдёт из маленького пузыря в большой.

10. Капля устремится к узкому концу трубки, так как давление меньше под поверхностью меньшего радиуса кривизны.

11. 30 см; нет.

12. $p = \rho g h + \frac{2\sigma}{r} = 480$ Па.

13. $p = p_0 - \frac{\rho g h}{4}$.

14. $h_1 = \frac{2\sigma \cos\theta}{r\rho(g + a)}$; $h_2 = \frac{2\sigma \cos\theta}{r\rho(g - a)}$.

15. $7{,}5 \cdot 10^{-5}$ кг.

16. Длина столбика равна $2h$, если $l > h$, и $l + h$, если $l \leqslant h$.

17. Мениск имеет форму вогнутого сферического сегмента; $R = \frac{2\sigma}{\rho g h} = 0{,}74$ мм.

18. $l = \frac{p_0 r h}{2\sigma - \rho g r h} + h = 5{,}5$ м.

19. Надо направить струю воды с малой скоростью сразу на стенку сосуда. Смачивая стенку, вода будет прилипать к ней.

Если есть центрифуга, то при вращении сосуда вода будет прижиматься к дальней от оси вращения стенке, а оттуда её можно за-

бирать шприцем. Лётчик-космонавт А. А. Серебров предложил более простой способ. Надо поместить внутрь сосуда длинный узкий предмет, например черенок ложки, к которому прилипает вода. Жидкость «расползается» по черенку, поднимается к горловине сосуда и отсасывается оттуда шприцем.

20. Вода не смачивает поверхности тарелок, но впитывается тканью тряпки.

Упражнение 7

2. 2.

3. $6{,}6 \cdot 10^{21}$.

4. При растворении кристаллическая решётка соли разрушается. Этот процесс требует затраты некоторого количества энергии, которое заимствуется от растворителя.

Во втором случае часть межмолекулярных связей кристаллической решётки уже разрушена при измельчении кристалла. Поэтому для растворения порошка требуется меньше энергии, и вода после растворения в ней соли будет иметь более высокую температуру. Эффект будет, правда, крайне незначительным.

5. Замерзание при 0 °C произойдёт только при наличии центров кристаллизации. Ими могут служить любые нерастворимые частицы. Когда масса воды велика, то в ней всегда найдётся хотя бы один такой центр, а этого уже достаточно, чтобы замёрзла вся вода. Если же вода раздроблена на мельчайшие капли, то лишь в сравнительно небольшом числе капель будут иметься центры кристаллизации и замёрзнут только эти капли.

6. $t = \dfrac{(c_1m_1 + c_2m_2)t_1 + (c_2t_2 - \lambda)m_3}{c_1m_1 + c_2(m_2 + m_3)} \approx 14$ °C.

7. $c = \dfrac{Q_1\left(\dfrac{c_2}{c_1} + \dfrac{2\lambda}{c_1\Delta t} + 1\right) - 2Q_2}{\left(\dfrac{c_2}{c_1} - 1\right)\Delta t + \dfrac{2\lambda}{c_1}} = 630$ Дж/К.

8. $m_1 = \dfrac{m_2[\lambda + r + c_2(t_3 - t_2)] - m_3r}{c_1(t_1 - t_3)} \approx 1{,}2$ кг.

9. $m = 0{,}05$ кг.

10. 88%.

11. 78 г.

12. $3{,}36 \cdot 10^5$ Дж/кг.

13. 5,6 г.

14. $t = 0$ °C.

15. $v = 2460$ м/с.

Упражнение 8

1. $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\alpha_1''}{\alpha_1'}$.

2. $p_2 = p_1 \frac{t_2}{t_1} = 7{,}5 \cdot 10^7$ Па.

4. Увеличится на 59 $см^2$.

5. 3,6 МДж.

6. $\Delta t = \frac{n}{300\alpha_1} = 100$ °C.

7. $\alpha = \frac{h_2 - h_1}{h_1 t_1 - h_2 t_2}$.

8. $V_0 = \frac{V(1 + 3\alpha_1 t)}{(\alpha - 3\alpha_1)t} \approx 190$ $мм^3$.

9. $\alpha = \frac{3(\alpha_1 V_1 \rho - \alpha_2 m)}{V_1 \rho - m} = -3{,}8 \cdot 10^{-5}$ $К^{-1}$.

Отрицательное значение температурного коэффициента объёмного расширения воды означает, что нагревание происходило в интервале от 0 до 4 °C.

ОГЛАВЛЕНИЕ